

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов»

О.В. Хренов, А.А. Дмитриевич, А.В. Лешок

МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ ФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Учебно-методическое пособие
по дисциплине «Теория и технология получения порошковых материалов»
для студентов специальности 1-42 01 02
«Порошковая металлургия, композиционные материалы и покрытия»

Учебное электронное издание

М и н с к 2011

УДК 621.762 (076.5)

Авторы:

О.В. Хренов, А.А. Дмитриевич, А.В. Лешок

Рецензенты:

Ю.В. Соколов, профессор кафедры «Материаловедение в машиностроении» БНТУ, доктор технических наук, профессор;

В.М. Капцевич, заведующий кафедрой «Технология металлов» БГАТУ, доктор технических наук, профессор

Учебно-методическое пособие по дисциплине «Теория и технология получения порошковых материалов» предназначено для студентов, специализирующихся в области порошковой металлургии.

В пособии содержатся сведения о составе материалов применяемых при производстве фрикционных изделий, истории создания, характеристиках материала МК-5, обзоре технологий, режимах изготовления фрикционных дисков.

Цель данного пособия – оказание помощи студентам в написании дипломного проекта, а так же курсового проекта по дисциплине «Конструирование и расчет технологической оснастки».

Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.(017) 292-77-52 факс (017) 292-91-37
Регистрационный № БНТУ/МТФ34-6.2011

© БНТУ, 2011

© Хренов О. В., 2011

© Хренов О. В., компьютерный дизайн, 2011

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ФРИКЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ	5
2 ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ..	15
3 СОСТАВ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	18
4 МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЙ ФРИКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ МК-5.....	24
5 МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ФРИКЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	29
6 МЕТОД СВОБОДНО НАСЫПАННОГО СЛОЯ	32
7 МЕТОДЫ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ.....	34
8 ОСНОВНЫЕ ТИПЫ МАШИН ТРЕНИЯ	38
ЛИТЕРАТУРА.....	42

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных проблем машиностроения является создание узлов и механизмов, обладающих высокими эксплуатационными требованиями, ресурсом работы, надёжностью. Постоянно растущая энергонагруженность при минимизации размеров узлов и механизмов требует создания новых материалов и совершенствования имеющихся технологий изготовления конструктивных элементов. Одной из прогрессивных технологий машиностроения является порошковая металлургия, которая позволяет реализовывать безотходное производство, резко сокращать трудовые затраты, снижать количество технологических операций и создавать материалы с уникальными свойствами.

Среди большого разнообразия композиционных материалов получаемых методом порошковой металлургии особое место занимают металлокерамические фрикционные материалы, обладающие стабильно высокими эксплуатационными свойствами. Такого рода материалы начали активно применяться в машиностроении вс 50-60-е годы прошлого века. Этот же период отмечается наибольшим числом важных инженерных решений в области создания новых составов материалов и технологий получения готовых изделий. Теоретические и практические разработки И.М. Федорченко, В.М. Крячек, И.И. Панаиоти и других учёных позволили значительно расширить применение фрикционных материалов получаемых методом порошковой металлургии. Металлокерамические фрикционные материалы активно применяются в авиационной промышленности, машиностроении и сельском хозяйстве, горно и нефтедобывающих отраслях, железнодорожном транспорте и других.

Основными достоинствами таких материалов являются: стабильное значение коэффициента трения ($0.05 \div 0.09$ для композитов на основе меди); высокая износостойкость ($1 \div 8$ мкм/км); хорошая теплопроводность ($0.065 \div 0.13$ кал/см·град); низкая зависимость коэффициента трения от климатических условий; высокий срок службы ($9000 \div 10000$ моточасов); экологическая чистота процесса получения.

Широкое распространение в машиностроительной отрасли получили фрикционные изделия в виде дисков, представляющих собой стальную несущую основу с нанесённым с двух сторон фрикционным слоем. Медь в качестве материал основы используется преимущественно для узлов трения, работающих в условиях граничной смазки, при относительно не высоких контактных температурах (до 400°C). Состав материала определяет технологию получения конечного изделия.

В настоящий момент существует большое количество способов получения фрикционных дисков (напекание, напыление, электроформование, накатка и другие), однако наиболее производительным является способ напекания свободно насыпанного слоя к стальной основе через тонкий компактный подслои меди, наносимый гальваническим способом. Указанный способ обладает относительно высокой производительностью, отличается технологической простотой, позволяет получать фрикционные диски большого размера.

1 МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ФРИКЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

В тормозных и передаточных узлах и механизмах нашли применение различные фрикционные материалы [1-7]. В течение десятилетий серый чугун был единственным фрикционным материалом, недорогим и технологичным. Самым большим его недостатком являлась значительная зависимость коэффициента трения от скорости в начале торможения, а также от усилия прижатия (тормозная сила равна силе прижатия, умноженной на коэффициент трения). Однако этот недостаток компенсируется оптимизацией управления процессом торможения. В настоящий момент появились различные типы фрикционных материалов, такие как:

- материалы на основе термореактивных смол (формованные из массы; прессованные из картона (картонно-бакелитовые) со специальной пропиткой; изготовленные из текстильной ленты с пропиткой (ткано-бакелитовые); спиральнонавитые, изготовленные из армированной нити с пропиткой; эллипсоonavитые, из армированной нити, но уложенные более рациональным способом);
- материалы из углерода или углеродной композиции;
- материалы на целлюлозно-бумажной основе;
- материалы с керамической матрицей;
- металлокерамические материалы.

Каждому типу материала характерны свои условия эксплуатации, энергонагруженности, конструктивного исполнения элемента трения. Существенный сегмент материалов трения занимают фрикционные материалы на основе термореактивных смол. Они представляют собой сочетание связующего (смолы или каучука) с волокнами, а также минеральными и органическими наполнителями разных видов и процентного содержания (использовавшийся ранее в качестве наполнителя асбест с 1989 года в Европе запрещен к применению). Данные материалы отличаются стабильно высоким значением коэффициента трения (0.12-0.35), равномерностью износа и существенно меньшим её значением по сравнению с серым чугуном (3-6 раз), низким уровнем шума (до 10 дБ), не высокой стоимостью. Изделия из фрикционного материала на основе термореактивных смол эксплуатируются в основном в узлах сухого трения.

По ГОСТ 1786 [8] к фрикционным накладкам предъявляется ряд требований:

- высокий коэффициент трения, мало изменяющийся от температуры, давления, скорости буксования ($\mu=0.28-0.62$);
- высокие износостойчивость и прочность (накладки должны выдержать без разрыва угловую скорость, в 2 раза превышающую максимальную угловую скорость двигателя);
- плавное, пропорциональное нажимному усилию нарастание силы трения;
- достаточная термостойкость и теплопроводность (температура накладок не должна превосходить при длительной работе 200° С, при кратковременной 350° С).

В своём составе фрикционные материалы на основе термореактивных смол должны содержать компоненты, выполняющие определённые функции:

- повышение износостойкости – смоляные частицы и графит;
- повышение теплопроводности и плавности включения – медь, латунь, бронза, алюминий (в виде порошка, стружки или проволоки);
- повышение стабильности коэффициента трения – цинк;
- уменьшения износа и задираобразования – свинец.

По механизму фрикционного действия фрикционные материалы на полимерной основе подразделяются на две группы. В материалах первой группы повышение коэффициента трения

достигается главным образом за счет выбора связующего с увеличенной молекулярной массой межузлового фрагмента пространственной сетки.

В материалах второй группы используют жесткое теплостойкое связующее, трение таких материалов происходит в стеклообразном состоянии. Значение коэффициента трения регулируют подбором состава связующего, режимов его отверждения, видом и количеством наполнителей, общее содержание которых может достигать 90% от объема материала. В качестве связующего в фрикционных материалах из каучуков применяют бутадиеновые (СЕБ, СКБСР, СКД), бутадиен – нитрильные (СКН-26 м), бутадиенметилвинил-пиридиновые, стирольные, метилстиральные и другие синтетические каучуки. Широко применяют фенолформальдегидные смолы.

Фрикционные изделия на основе чистых фенольных смол имеют повышенную хрупкость и сравнительно низкий коэффициент трения. В целях устранения этих недостатков используют модифицированные смолы, модификаторами которых служат канифоль, льняное масло и другие продукты.

Фрикционные изделия на каучуковом связующем отличаются достаточно высокими коэффициентом трения и износостойкостью при температурах до 200–250°C. При более высоких температурах, например, в тяжело нагруженных узлах трения каучуковые материалы имеют недостаточную износостойкость и вследствие этого низкий уровень коэффициента трения и повышенную интенсивность изнашивания.

Смолы придают изделиям более высокую теплостойкость. Недостатком изделий на смоляном связующем является сравнительно низкий и недостаточно стабильный при увеличении температуры коэффициент трения, а также повышенная в сравнении с каучуковыми материалами хрупкость.

Применение комбинированного связующего (совместив каучук и смолу) позволяет в некоторой степени совместить положительные качества каучука и смолы в одном изделии. Соединенные между собой с помощью связующего частицы и волокна при следующей термической обработке (вулканизация, бакелизация) образуют монолитный материал. Процесс вулканизации каучука в основном осуществляется с помощью серы (9–12 масс. долей %). Отверждение резольных смол осуществляется нагреванием, новолачных – также нагреванием в присутствии отвердителя (гексаметилентетрамина).

Одним из факторов, часто ограничивающих возможности применения фрикционных полимерных материалов является их низкая теплостойкость. Для теплонагруженных конструкций традиционные полимерные композиционные материалы не пригодны, так как утрачивают деформационную устойчивость уже при температурах выше 200°C [17].

Известно, что полимерные материалы из полиимидов сохраняют работоспособность в интервале температур от 196°C до 400°C. Жесткость макромолекул и высокая полярность их звеньев в сочетании с высокой концентрацией циклов обусловили неплавкость и нерастворимость большинства высокомолекулярных линейных полиимидов. Температура их размягчения (390–430°C) приближается к температуре деструкции (420–460°C), а вязкость размягченного полиимидов достигает 10^8 – 10^9 Па·с [9,10].

Нерастворимость и неплавкость полиимидов создает непреодолимые трудности при попытках изготовить наполненный пластик и изделие из него традиционными методами и на типовом оборудовании. Порошки полиимидов предложено смешивать с порошковым наполнителем и перерабатывать методом спекания в заготовки простых форм при температурах 400–450 °C и давлениях 100–150 МПа с последующей механической обработкой в изделия.

Чтоб добиться растворимости полимера на стадии наполнения и плавкости полуфабриката в период формообразования изделий были синтезированы различного типа форполимеры и олигомеры в которых после окончания формообразования изделия завершается переход в высокомолекулярный линейный или сетчатый полиимид. Однако, форполимеры

(полиамидокислоты, полиамидоэфир) и олигомеры (олигоамидокислоты, олигоимиды) растворимы лишь в высококипящих амидных растворителях.

В настоящее время известно, что наилучшей теплостойкостью обладают материалы на основе гетероциклических полимеров – полиимидов. На их основе разработаны марки полимерных материалов. В России составы такого типа известны под марками СП (НИИПМ) и АПИ-2 (МАТИ) [11].

Составы АПИ-2 представляют собой смесь трех имидообразующих мономеров, при их взаимодействии образуется олигоимид, содержащий π – связи в концевых звеньях. Такие олигоимиды переходят в сетчатый полиимид (отверждаются) по реакции пиролитической полимеризации. В составе АПИ-2 (зарубежные аналоги PMR-11, 15, LARC-160) удаление растворителя, образование олигоимид, его превращение в сетчатый полиимид проходит в строгой последовательности, не перекрывая друг друга. Олигомерная форма связующего в наполненном полуфабрикате обеспечивает достаточную текучесть на стадии формования. Вязкость олигоимид АПИ-2 при 250–290°C составляет $\approx 10^6$ Па·с, идет при 340–360°. Пластики на основе АПИ-2 характеризуются высоким уровнем физико-механических свойств в широком диапазоне температур эксплуатации.

Стадия изготовления материала на основе связующего АПИ-2 является чрезвычайно длительной, так как ее приходится проводить по ступенчатому режиму. Это обусловлено тем, что одновременно с образованием олигоамидокислоты, а затем олигоимид при непрерывном повышении молекулярной массы и вязкости, необходимо максимально полно удалить растворитель, чтобы снизить пористость будущих изделий.

Введение полимера – разбавителя целесообразно осуществлять на начальной стадии синтеза полиимид АПИ. Состав АПИ, в котором в качестве растворителя использован фуриловый спирт носит название АПИ-3. Присутствие в составе связующего фуранового полимера увеличивает время вязко-текучего состояния при одновременном снижении температур отверждения олигоимид до 300°C, сокращается и длительность отверждения. Эффективная энергия активации начала процесса отверждения снижается с 93,2 кДж/моль до 53,0 кДж/моль поскольку фурановый полимер принимает участие в реакции полимеризации олигоимид. При этом, на границе раздела фаз образуется, по видимому, сетчатый фурановый полимер.

Наиболее распространенным армирующим компонентом для фрикционных материалов на полимерной основе ранее являлось асбестовое волокно. Обладая высокой прочностью (до 3 ГПа), оно обеспечивает высокие механические свойства и теплостойкость. При температуре 400°C прочность асбестового волокна снижается лишь на 20 %, полное разрушение наступает при 700-800°C. Фрикционные изделия в тормозах и муфтах сцепления работают в условиях знакопеременных тепловых нагрузок (периодические нагревы и охлаждения), армирование асбестом в этом случае повышает стойкость изделий к растрескиванию. Асбест обладает способностью очищать поверхности трения от загрязнений, что обеспечивает высокие значения коэффициента трения (до 0,8) [12].

Из-за вредных воздействий на окружающую среду и здоровье человека применение асбеста во многих узлах трения запрещено решением ЮНЕСКО. Это создало очень серьезную научно-техническую проблему замены асбеста во фрикционных материалах другими экологически чистыми материалами.

В качестве армирующих компонентов, наряду с асбестом, используют минеральную (шлаковую) вату. Минеральная вата не разрушается при температуре до 700 °C, но в связи с хрупкостью и наличием в составе твердых включений («корольков»), повреждающих поверхность фрикционного контртела, имеет ограниченное применение. В качестве армирующих компонентов применяют также стеклянные, базальтовые, углеродные и другие волокна [13].

На рисунке 1 представлены образцы фрикционных накладок изготавливаемых на полимерной основе.



В 80-90 годах под руководством Пинхасовича А.В. разрабатывается фрикционный материал, получаемый путём плетения ткани из базальтового волокна и стеклонити, армированного стальной нитью (рисунок 2).



8

Полученная таким образом пряжа обрабатывалась по форме требуемого изделия и в специальной пресс-форме в присутствии органического связующего прессовалась в готовое изделие (рисунок 3). Изготовленные фрикционные накладки по данной технологии испытывались на технике ГАЗ, MANNESMAN Sachs и получили положительное заключение.



Рисунок 3 – Изделия, полученные из пряжи с базальтовым волокном

Фрикционные углерод-углеродные материалы получили широкое распространение в авиационных тормозных системах и практически не имеют конкурентов благодаря уникальным свойствам:

- высокой термостойкости, позволяющей использовать их в тормозах со значительно большей энергонагруженностью, чем это было возможно с применением предшественников - металлокерамических материалов;
- высокому и стабильному в самых различных режимах эксплуатации коэффициенту трения;
- способность к быстрому поглощению выделяющейся при торможении самолета кинетической энергии, предотвращающему перегрев остальных деталей шасси;
- высокой механической прочности при статических и динамических нагрузках в широком диапазоне температур;
- высокой износостойкости, обеспечивающей значительно больший ресурс тормоза в сравнении со всеми ранее применявшимися материалами;
- малому удельному весу, позволяющему значительно снизить полетную массу по сравнению с металлокерамикой;
- экологической безопасности.

Существует большое количество технологий получения углерод-углеродных материалов, при этом на АК "Рубин" разработана и внедрена оригинальная технология изготовления тормозных дисков из фрикционного композиционного углеродного материала Термар-АДФ-ОС. В отличие от широко распространённых за рубежом технологий, базирующихся на газофазном уплотнении (CVI) волокнистого каркаса из углеродного войлока, она основана на жидкофазной пропитке волокнистого каркаса органическим связующим (каменноугольным пеком) с преобразованием последнего в углерод (карбонизации) при высоких температурах и давлениях. Преимуществом разработанной технологии является возможность получения дисков с более высокой по сравнению с аналогами плотностью, высокими и стабильными при различных условиях эксплуатации фрикционными характеристиками, высокой прочностью, окислительной и износостойкостью, что, в конечном итоге, предопределяет высокую энергоёмкость и большой ресурс тормозов. Кроме того, благодаря использованию такой технологии, существенно сокращается продолжительность производственного цикла.

В таблице 1 представлены физико-механические характеристики углерод-углеродных фрикционных материалов.

Таблица 1 – Физико-механические характеристики углерод-углеродных фрикционных материалов

Марка	ТЕРМАР-ФММ	ТЕРМАР-ДФ	ТЕРМАР-АДФ
Плотность, г/см ³	1,70-1,75	1,80-1,85	1,80-1,90
Предел прочности, МПа			
при сжатии	100-120	120-150	150-200
при изгибе	140-160	80-85	130-150
при сдвиге	5-10	9-10	15-20
Коэффициент теплопроводности, Вт/м* °С			
параллельно оси прессования	15-20	23-25	30-40
перпендикулярно оси прессования	35-40	50-100	50-60
Температурный коэффициент линейного расширения, 1/ °С			
при 20-200 °С	-	0.5-1.0	0.1
при 20-400° С	-	0.8-1.3	0.3
при 20-600 °С	-	1.1-1.5	0.7
Фрикционные характеристики			
коэффициент трения	0.35-0.40	1.5-2.0	0.25-0.30
линейный износ, мкм/торм	0.25-0.50	0.28-0.35	0.5-1.0

В таблице 2 представлены эксплуатационные характеристики углерод-углеродных фрикционных материалов производства АК «Рубин».

Таблица 2 – Эксплуатационные характеристики тормозов на основе углеродных тормозных дисков производства АК «Рубин»

Обозначение изделия	Количество и размеры (мм) дисков	Эксплуатационная энергонагруженность, 10 ⁵ кгс·м	Эксплуатационный тормозной момент, кгс·м
КТ166	5 штук (505-340) x 20,3	31,0	2700
КТ191	5 штук (490-320) x 18,9	26,5	2200
КТ196М	5 штук (439-292) x 18,9	18,0	1800
КТ216	5 штук (439-292) x 18,9	22,0	1700
КТ240	2 штуки (318-203) x 18,2	2,9	265

В восточноукраинском национальном университете имени В. Даля совместно с Национальным научным центром «Харьковский физико-технический институт» разработана технология и изготовлены опытные образцы на основе углеродной матрицы с различными упрочняющими каркасами и последующим газофазным насыщением. В [17] качестве волоконных наполнителей использовались углеродная ткань УРАЛ ТМ-4 (УТ) и асбестовая ткань АТ-2 (АТ). Ленты требуемой длины и ширины наматываются на оправки-нагреватели и плотно укатываются, плотность намотки при этом составляет около 0,57 г/см³. Затем в установке пиролиза заготовки на оправках-нагревателях нагревались природным газом до 1000 °С. Уплотнение пироуглеродом проводится методом радиально движущейся зоны пиролиза [18] при скорости движения 0,51 мм/ч. Общая длительность процесса составляет около 54 ч. Полученный таким образом углерод-углеродный фрикционный материал имеет структуру представленную на рисунке 4.

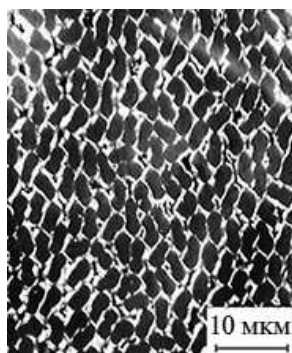


Рисунок 4 – Структура углерод-углеродного фрикционного материала

Результаты испытаний коэффициента трения углерод-углеродного материала в зависимости от температуры представлены на рисунке 5.

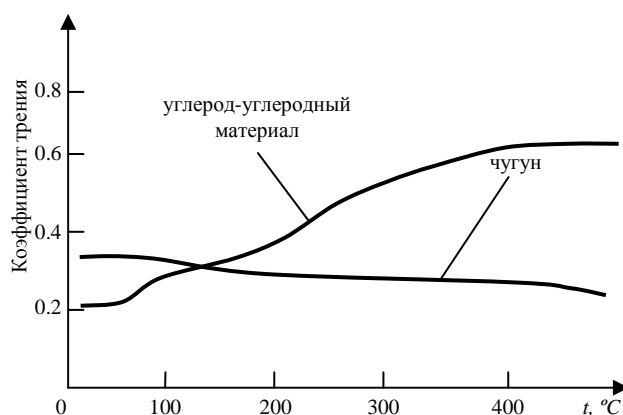


Рисунок 5 – Результаты испытаний коэффициента трения углерод-углеродного материала при удельном давлении 0.15 МПа

Для углерод-углеродного материала характерная устойчивая тенденция роста коэффициента трения с увеличением температуры контактной поверхности. При этом рост коэффициента трения начинался при температуре 100 °C и достигал своего стабильного значения $\mu = 0.5-0.6$ при температуре 400 °C. Необходимо отметить, что при более низких температурах (до 50 °C) величина коэффициента трения изменяется в пределах от 0,17 до 0,28.

С целью повышения и стабилизации коэффициента трения при низких температурах выполняется модификация низкомодульных углеродных волокон твердыми мелкозернистыми материалами типа окиси алюминия и карбида бора, а упрочняющий каркас усиливается медной проволокой диаметром 0.15 мм. Значение коэффициента трения при низких температурах принимает стабильное значение 0.35-0.4 [19].

Среди фрикционных материалов последнего поколения, которые могут использоваться в высоконагруженных системах торможения, являются материалы с керамической матрицей. Благодаря исключительно высокой твердости и стойкости к абразивному износу распространение получили материалы с карбидокремниевой матрицей армированной углеродными или другими типами волокон. Основными достоинствами данных материалов являются: относительно малая плотность, позволяющая уменьшить вес узла; высокая износостойкость в различных средах; способность поглощать большое количество тепловой энергии; высокая стойкость к термическому удару; высокая рабочая температура (до 1000 °C). В настоящее время известно большое количество методов получения фрикционных изделий на керамической основе, однако наиболее распространенным является жидкофазный метод. Здесь

можно выделить два варианта реализации процесса: первый, на основе высокотемпературного пиролиза кремнийсодержащих полимеров, которым пропитывают волокнистый каркас; второй основан на механизме реакционного спекания материала заготовки в процессе силицирования – пропитки расплавов кремния. Фрикционные композиты с карбидокремниевой матрицей эффективно применяются в самолётах, тяжелонагруженных и скоростных автомобилях, мотоциклах, тяжёлой боевой технике, скоростном железнодорожном транспорте, подъёмно-транспортных устройствах [18].

В настоящее время фрикционные материалы на керамической основе фирмы («Brembo») активно устанавливаются на мировые автомобильные бренды: Aston Martin, Bentley, Bugatti, Mercedes, Ferrari, Lamborghini, Porsche. На рисунке 6 представлен тормозной механизм использующий фрикционные изделия из материала на керамической основе для автомобиля Ferrari.



Рисунок 6 – Узел с фрикционным изделием на керамической основе

При сравнительно лёгких режимах эксплуатации находит применение фрикционный материал на целлюлозной основе, так называемые «бумажные» фрикционные материалы. Данный материал характеризуется повышенными требованиями по шероховатости ответной детали (контртела) и сравнительно не высокой температурой эксплуатации (до 120 °С). Данные материалы применяются при удельном давлении до 6 МПа и скорости скольжения не более 40 м/с.

На рисунке 7 представлены зависимости изменения коэффициента трения от скорости скольжения фрикционного материала на целлюлозной основе, из которой видно, что при скорости скольжения более 90 об/мин коэффициент трения принимает стабильное значение 0.12-0.14.

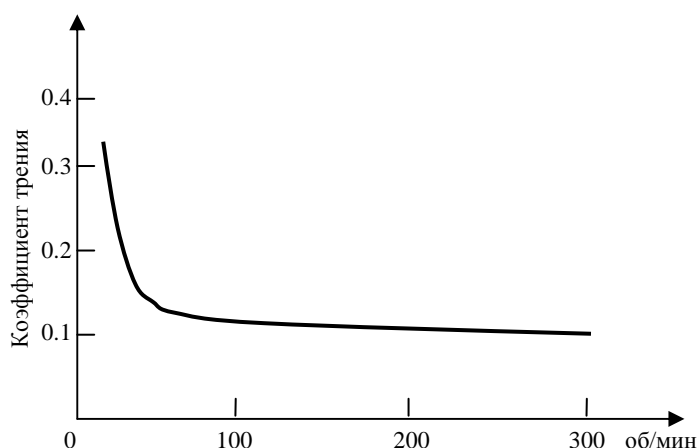


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения фрикционного материала на целлюлозной основе

Технология изготовления фрикционных дисков на целлюлозной основе состоит из операции наклеивания фрикционной бумаги на стальную основу специальным клеем (рисунок 8), имеющим высокую теплопроводность, возможность выдерживать циклическую знакопеременную нагрузку.

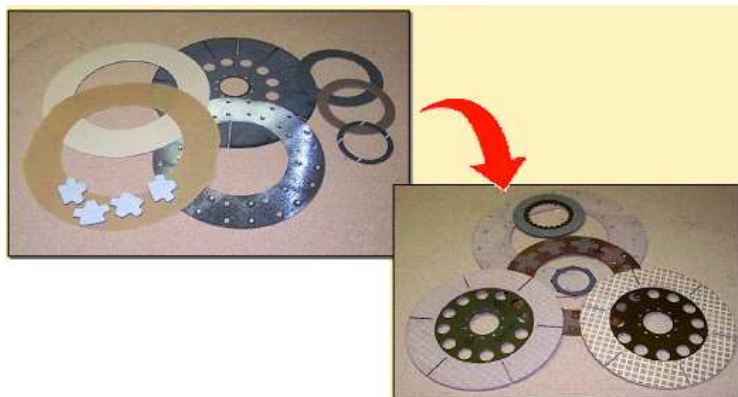


Рисунок 8 – Фрикционные диски с фрикционным материалом на целлюлозной основе

Разнообразные условия работы фрикционного материала (широко варьируемые удельные нагрузки и скорости трения, рабочие среды – масло, воздух, вакуум) требуют создания универсального материала. Одним из радикальных методов, позволяющих решить эту проблему, является изготовление материала порошковой металлургией. Он позволяет получить металлокерамический материал, имеющий следующие достоинства:

- 1) устойчивое значение коэффициента трения;
- 2) высокую износостойкость;
- 3) хорошую теплопроводность;
- 4) низкую зависимость коэффициента трения от климатических условий;
- 5) более высокий срок службы;
- 6) экологическую чистоту метода получения;
- 7) низкая стоимость.

Такие материалы вследствие большой массы имеют повышенный момент инерции, а абразивные свойства таковы, что более интенсивно изнашивается ответная деталь (контртело). Наряду с активным использованием фрикционных дисков с металлокерамическим фрикционным слоем в автотракторной технике началось их применение в железнодорожном транспорте. Большое количество европейских производителей подвижного железнодорожного транспорта активно применяют фрикционные накладки для тормозов (рисунок 9). Фрикционные накладки изнашивают диск тормоза, а не дорогостоящее колесо.

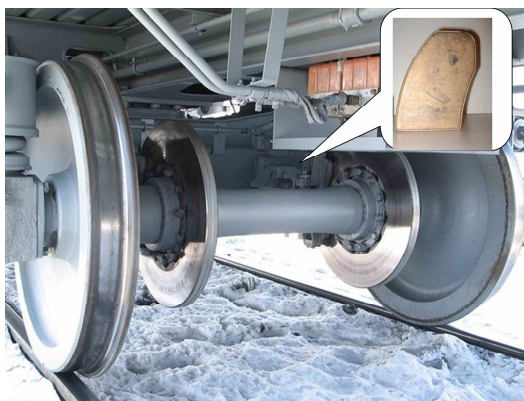


Рисунок 9 – Тормоз железнодорожного вагона с металлокерамической фрикционной накладкой

Физико-механические характеристики некоторых типов фрикционных материалов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Физико-механические характеристики фрикционных материалов

Показатель	С наполнителем		Кортонно-латексные	Кортонно-бакелитовые	Ткане-Бакелитовые	Металло-керамические	Спирально-навитые
	каучук	комбинированный					
1	2	3	4	5	6	7	8
НВ, МПа	230	220-270	190	320	280-370	250-280	110-170
ρ , г/см ³	2.2	1.9-1-2.3	1.6	2.0	2.0-2.1	6-6.2	1.5-1.8
$\sigma_{ср}$, МПа	34	24-45	51	84	81-90	-	11-12
$\sigma_{сж}$, МПа	89	63-110	73	104	95-102	80-100	37-57
$\sigma_{разр}$, МПа	34	18-36	11	55	18-19	-	14-28
$E_{изг}$, МПа	3200	3500-4500	4800	5600	4700-4900	-	3300
μ	0.47	0.38-0.53	0.43	0.34	0.41-0.44	0.17-0.19	0.5-0.57
c , кДж/(кг ⁰ С)	1.13	0.92-1.13	1,09	1.05	1.22	0.95-1.0	1.26-1.34
λ , Вт/(м ⁰ С)	0.51	0.42-0.48	0.35	0.35	0.44-0.45	-	0.38

Допустимые значения давлений, коэффициента трения и температуры при работе фрикционных пар представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Допустимые значения давлений, коэффициента трения и температуры фрикционных пар

Фрикционная пара	Коэффициент трения			Допустимое давление, МПа	Допустимая температура, °С
	без смазки	со смазкой	с попаданием масла		
Металлокерамика – закалённая сталь	0.18-0.40	0.08-0.15	-	без смазки 0.3-0.5 со смазкой 0.8-1.0	-
Ретинакс марки ФК-24А-(ГОСТ10851-73) – закалённая сталь	0.25-0.35	0.08-0.10	-	без смазки 1.0-1.5	600-800
Прессованный асбест – закалённая сталь	0.3-0.4	0.1-0.2	-	без смазки 0.2-0.4 со смазкой 0.5-1.0	150-250
Композиционный материал марки НСФ-6 (ГОСТ1786-74) на основе каучука с металлическим наполнителем – закалённая сталь	0.40-0.53	-	-	-	100-150
Тормозная лента ВИАМ-12 – сталь	0.28-0.33	0.08-0.10	-	без смазки 0.6-0.8 со смазкой 0.9-1.0	-
Бронза – сталь	0.10-0.15	0.05-0.10	0.10	без смазки 0.4-0.5 со смазкой 0.6-0.8	150
Чугун – сталь	0.15-0.18	0.06-0.08	0.12	без смазки 0.25-0.4 со смазкой 0.6-0.8	150
Чугун – чугун	0.15-0.20	0.05-0.08	0.15	без смазки 0.4-0.6 со смазкой 0.6-1.0	300

2 ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В отличие от антифрикционных материалов, которые характеризуются низкими значениями работы трения (потерь на трение), для фрикционных необходим высокий уровень работы трения. За последние 50 лет возросли основные параметры машин: масса, скорость движения и маневренность, повысилась их энергонасыщенность в целом и отдельных узлов, увеличился примерно в 2—3 раза ресурс их эксплуатации. На первых этапах развития машиностроения в тормозах и муфтах широко использовались ткань, кожа, различные породы дерева, литые материалы (чугун, сталь). Развитие химической промышленности позволило создать в 20-х годах новый тип фрикционных материалов - асбофрикционные, которые широко применяются. Однако дальнейший рост энергонасыщенности тормозных и передаточных устройств требовал создания и применения фрикционных материалов, способных работать в более тяжелых условиях.

Фрикционные порошковые материалы содержат металлические и неметаллические компоненты, часто заметно отличающиеся по своим физико-механическим и химическим свойствам. Металлическую основу таких материалов обычно составляют железо, медь, никель; к компонентам, регулирующим величину адгезионных связей и способствующих плавности трения, относятся графит, сульфиды, нитриды, легкоплавкие металлы и др. В качестве фрикционных добавок, повышающих коэффициент трения, используются оксиды, карбиды, сложные соединения минерального происхождения.

В нашей стране в 1941 - 1942 гг. из фрикционных порошковых материалов были впервые изготовлены диски для двигателей. Сведения о порошковых материалах на основе меди, превосходящих по своим свойствам традиционные асбестовые, появились в 1948 году, а фрикционный материал на основе железа был разработан в 1948 году.

В 1950 - 1959 гг. был создан материал на основе меди, содержащий олово, свинец, железо и графит, а также гамма материалов на его базе с различными добавками (асбестом, диоксидами кремния и молибдена, карбидом кремния), разработан технологический процесс изготовления из них дисков для работы без смазки и со смазкой в фрикционных узлах приборов, а также в масляных трансмиссиях автомобилей, тракторов, тепловозов и других машин. В эти же годы были разработаны составы материалов, технология изготовления из них дисков для приборов и станков, организован их производственный выпуск.

К этому времени относится создание материала на основе железа, содержащего медь, графит, барий, диоксид кремния и асбест, разработана схема технологического процесса изготовления из него фрикционных элементов. Материал ФМК11, получивший практическое применение, по коэффициенту трения и износостойкости, фрикционной теплостойкости, механическим характеристикам превосходил до сих пор известные материалы. Использование материала ФМК11 вместо асбофрикционного в тяжело нагруженных материалах позволило создать более компактные и энергоемкие тормоза, увеличить ресурс их работы и надежность в эксплуатации.

В 1959 г. были опубликованы результаты испытаний нового фрикционного материала на основе железа ФМК8, который в отличие от ФМК11 был легирован хромом, никелем, вольфрамом, обладал значительным преимуществом по износостойкости и механическим свойствам и применялся также в тяжело нагруженных тормозах.

Научно-технический потенциал 50-х годов послужил началом быстрого развития исследований по созданию новых фрикционных материалов, технологии изготовления изделий (дисков и накладок различной конфигурации), изучению их свойств в различных условиях эксплуатации.

В 1960 - 1980 гг. увеличилось количество работ, в которых был отражен качественно новый подход к решению задачи по созданию новых материалов и использованию их в машиностроении. Интенсивно развивались исследования взаимосвязи структуры и свойств материалов, процессов, протекающих при трении в приповерхностных и поверхностных слоях

материала, их влияния на триботехнические характеристики фрикционных пар, влияния тепловых полей и нагрузочных параметров на характер физико-химико-механических процессов, протекающих на поверхностях трения, воздействия технологических факторов на эксплуатационные свойства порошковых материалов. Работы по созданию материалов ведутся с использованием результатов фундаментальных наук: теории трения и изнашивания, тепловой динамики трения, законов физики твердого тела и физикохимии процессов.

Был создан ряд новых материалов на основе меди, отличающихся от существовавших более высокими теплостойкостью, износостойкостью и стабильностью коэффициента трения, а также принципиально новый тип материала на медной основе, содержащий алюминий, который либо полностью, либо частично заменяет дефицитное и дорогостоящее олово.

Материалы на основе алюминиевой и алюминиево-оловянной бронзы по сравнению с материалами на основе оловянистой бронзы имеют примерно вдвое более высокие механические характеристики и износостойкость, более высокий коэффициент трения. Широкие испытания этих материалов в вариаторах и гидротрансмиссиях тракторов показали их высокую работоспособность. В те же годы была выполнена серия исследований по созданию материалов на основе бронзы для работы преимущественно со смазкой с более высоким коэффициентом трения и износостойкостью в сравнении с известным тогда материалом МК-5. В результате исследовательских работ была создана серия материалов на основе оловянистой бронзы с добавками бентонита, асбеста, муллита и других элементов, предназначенных для работы в масле, была разработана технология изготовления из них дисков для муфт предельного момента и включения, тормозов различных дорожных машин, автомобилей, тракторов.

В начале 60-х годов завершилась разработка промышленной технологии изготовления изделий из материала ФМК11 и началось их промышленное производство. Одновременно выполнялись работы по улучшению триботехнических характеристик материала ФМК11, что было достигнуто введением в его состав 5 % сернистого железа и по 5 % карбидов кремния и бора.

Из материала марки МКВ50А было организовано промышленное производство накладок дисков тяжело нагруженных тормозов. Тогда же были созданы два новых материала: на железофосфорной основе, отличающийся от известных содержанием алюминия и фосфора, и на основе железа, легированного марганцем. Первый материал нашел применение во фрикционных узлах испытательных машин, а второй (СМК80) – в тяжело нагруженных тормозах и послужил основой при дальнейшей разработке материалов серии СМК. Материал СМК80 превысил по износостойкости материал МКВ50А в 1,5–2 раза и позволил создать компактный и энергоемкий тормоз с гарантированным ресурсом работы для тяжелых условий работы.

В 60-х годах значительно расширилось производство фрикционных материалов на ранее существовавших и новых предприятиях, был введен в действие специализированный участок по производству фрикционных дисков. В 1968 году началось изготовление фрикционных деталей на основе бронзы.

В 1970–1982 гг. усилия исследователей были направлены на улучшение триботехнических характеристик разработанных и применяемых материалов, уточнение их составов и совершенствование технологии изготовления, изучение свойств материалов в широком диапазоне нагрузочных параметров, а также на расширение производства выпускаемых и подготовку производства новых материалов.

В 1971–1976 гг. проводились исследования по созданию и внедрению новых материалов, предназначенных для работы в масле, на основе бронзы и железа с введением ситаллов. Эти материалы превосходят известные по коэффициенту трения в 1,5 раза, а по износостойкости в 1,2 раза.

В 1970–1978 гг. была выполнена серия работ по исследованию, разработке и внедрению новой технологии, высокопроизводительного оборудования, по организации массового производства фрикционных дисков для тракторов, автобусов и других машин.

В 1975-1976 гг. завершили работы по обобщению результатов исследования в области создания фрикционных материалов, изучению их свойств и применению их в машиностроении.

В конце 70-х годов был создан новый материал на основе титана, обладающий более высокой износо-, тепло- и коррозионной стойкостью; разработана также серия материалов, предназначенных для работы в муфтах сцепления и тормозах различных типов тракторов и транспортных машин.

Применение порошковых материалов на основе железа в муфтах сцепления и тормозах тракторов обеспечивает технический ресурс не менее 6000 ч, надежность в эксплуатации, сокращает простои оборудования и снижает затраты на ремонтные работы.

Дальнейшая разработка нового материала на основе бронзы, отличающегося меньшим содержанием олова, наличием альфа-кварца и диборида титана, что в совокупности снижает расход дорогостоящего олова, повысила на 30 % коэффициент трения и теплостойкость материала. Уже освоена технология изготовления из этого материала дисков фрикционов для тракторов.

Развитие научной мысли и технологических идей в области антифрикционных материалов начиная с 30-х годов, когда методом порошковой металлургии были получены первые изделия, свидетельствует об огромном прогрессе науки и техники в этой области. Уже к 80-м годам в нашей стране были созданы прочные основы для изготовления новых, еще более эффективных материалов. Взаимосвязь порошковой металлургии с другими отраслями техники на примере антифрикционных и фрикционных материалов состоит в том, что создание новых видов машин и конструкций, их модернизация часто зависят от наличия новых антифрикционных и фрикционных материалов и изделий.

В 1980 г. авторскому коллективу под руководством О.В. Романа за разработку и внедрение новых пористых материалов из металлических порошков, в том числе и фрикционных, присуждена Государственная премия Белорусской ССР.

В 1981 г. авторскому коллективу под руководством академика АН УССР И.М. Федорченко за разработку и внедрение новых материалов присуждена Государственная премия Украинской ССР.

Прослеживая развитие производства антифрикционных и фрикционных материалов, можно отметить определенные периоды, характеризующиеся созданием новых классов материалов, расширением сферы их применения, взаимосвязью науки и практики.

В 90-е годы в Институте порошковой металлургии (Минск) разрабатывается фрикционный материал на основе отходов шарико-подшипникового производства ШХ-15 марки Шадеф, характеризующийся высокими триботехническими свойствами.

Активно проведенная научно-практическая работа заведующего лабораторией фрикционных материалов А.А. Дмитриевичем позволила предложить рынку ряд новых материалов с повышенными физико-механическими свойствами, это материалы ФМ-10 и ФМ-12. Следует отметить, что А.А. Дмитриевичем проведен ряд научных изысканий в создании фрикционных материалов на целлюлозно-бумажной основе, имеющих массовое распространение в мировом машиностроении.

В настоящее время Институт порошковой металлургии (Минск) является головным научным учреждением в области разработки новых металлокерамических фрикционных материалов не только в Беларуси, но и признанным научным учреждением Европы.

3 СОСТАВ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Все компоненты входящие в состав спеченных металлокерамических фрикционных материалов условно можно разделить на 3 категории:

- материалы основы;
- материалы смазки и предохраняющие фрикционный материал от чрезмерного износа;
- материалы придающие высокие фрикционные свойства.

В качестве материала основы наибольшее распространение получили медь для работы в масле и железо для работы без смазки. При высокой температуре на поверхности трения, материалы на основе меди (бронза), имеющие относительно низкую температуру плавления, проявляют склонность к схватыванию с контртелом, приводящую к вырыванию частичек материала. Поэтому применение спеченных материалов на основе меди ограничивается узлами в которых температура на поверхностях трения не превышает 300° С.

При более высоких рабочих температурах в качестве материала основы используется железо, при этом температура на поверхностях может достигать до 1000÷1200° С. Использование металла в качестве материала основы обеспечивает материалу высокую теплопроводность и прирабатываемость, а так же большую величину отношения коэффициента трения материала к интенсивности его износа при торможении, что является очень важным для улучшения эффективности работы фрикционного узла. Наиболее распространённые металлокерамические фрикционные материалы на железной и медной основах, их свойства и характеристики представлены в таблицах 5 – 9.

Свинец, олово, сурьма, графит, сульфиды молибдена, железа или меди, сернокислые соли бария и железа, нитрид бора являются основными материалами служащими в качестве смазки и предохраняющие фрикционный материал от чрезмерного износа и заедания фрикционного узла. Для материалов работающих в условиях смазки количество таких материалов значительно ниже, чем для узлов работающих без смазки, из-за того, что масло в процессе работы полностью не выдавливается и образует тонкую плёнку.

В процессе трения чешуйки графита отрываясь одна от другой покрывают трущиеся поверхности, создавая устойчивую защитную плёнку. При увеличении его содержания более 9 % заметно снижается коэффициент трения и износостойкость, вследствие преобладающего действия графита. Кроме того, здесь играет роль снижение прочности материала из-за увеличения неметаллической составляющей. Для материалов на основе железа его содержание может быть немного больше, из-за того, что графит взаимодействуя с железом образует перлит и структурно свободный цементит, нейтрализующий смазывающее действие графита. Оптимальное содержание графита для материалов на медной основе 4-7 %, для материалов на железной основе 6-12 %. При значительном нагреве трущейся пары содержащийся в структуре металлокерамики свинец расплавляется и служит своего рода неметаллической смазкой, увеличение содержание которого приводит к снижению механических свойств, повышению износостойкости и снижению коэффициента трения. В структуре свинец представляется в виде обособленных участков, при этом он не взаимодействует ни с железом ни с медью. Присадка свинца к сложной композиции, содержащей добавки меди, вызывает значительное понижение износа при наличии ферритной структуры из-за устранения молекулярного взаимодействия трущихся поверхностей. Оптимальное содержание свинца для материалов на медной основе 5-8 %, на железной основе 5-15 %.

Медь, входящая в состав фрикционного материала на основе железа повышает теплопроводность. Взаимное их растворение оказывает влияние на уплотнение и упрочнение материала при спекании, если медь находится в жидкой фазе. Жидкая фаза обеспечивает более полное соединение частиц сплава, сфероидизацию зёрен железа и увеличивает усадку за счёт капиллярного воздействия жидкой фазы, также увеличивает прочность сцепления частиц металлической основы.

Таблица 5 – Химический состав фрикционных материалов на медной основе

Материал	Химический состав , % по массе						
	Cu	Sn	Pb	Fe	Графит	Ni	Прочие добавки
М-106	72	9	7	5	4	-	3 % асбест
М-106А	76	9	7	-	5	-	3 % асбест
М-140	73	9	8	4	4	-	1.5 % муллит
МК-5	72	9	8	4	7	-	
ФМ-1	71	9	5	4	4	-	3 % ситалл, 4 % концентрат молибдена
ФМ-2	79	-	6	4	4	-	3 % ситалл, 4 % нитрид бора
ФМ-3	71	9	8	4	7	-	
ФМ-4	71	9	8	4	7	-	1 % никель серноокислый
ФМ-5	67	9	8		7	-	9 % белый чугун
ФМ-6	63	9	8	4	6	-	1 % ситалл, 9 % концентрат молибдена
ФМ-7	70	8	8	4	7	-	3 % оксиды РЗЭ
ФМ-8	69	8	8	4	7	1	3 % оксиды РЗЭ
ФМ-9	71	8	8	4	7	-	2 % оксид итрия
Условные обозначения материала: Ф – фрикционный, М – медная основа, МК – металлокерамический, цифры после букв – порядковый номер материала							

Таблица 6 – Химический состав фрикционных материалов на железной основе

Материал	Химический состав, % по массе										
	Fe	Cu	графит кристалл.	никель серноокислый	Pb	Sn	Ситалл	асбест хризотилковый	барий серноокислый	силико- кальций	Прочие добавки
ФЖ-1	81	4	6	4	2	-	3	-	-	-	-
ФЖ-2	77	3	6	4	-	-	1	3	-	6	-
ФЖ-3	74	6	8	-	-	-	3	-	6	-	3 % концентрат молибдена
ФЖ-4	71	5	9	-	7	-	3	-	5	-	-
ФЖ-5	71	3	8	4	-	-	-	2	-	6	6 % порошок ПХ30
ФЖ-6	75	4	8	-	-	-	4	-	6	-	3 % нитрид ванадия
ФЖ-7	67	3	8	-	10	2	3	-	6	-	0.5 % нитрид бора
ФЖ-7А	67	3	8	-	10	2	3	-	6	-	-
ФЖ-8	62	3	10	-	15	2	5	-	-	-	3 % цинк сернистый
ФЖ-9	72	3	8	4	-	-	-	3	-	6	4 % кальций фтористый
Шадеф	-	-	12	-	15	-	3	-	-	-	68 % порошок ШХ15, 2 % цинк сернистый
ФЖ-10	77	3	6	2	-	-	-	3	-	6	3 % железо сернокислое
Условные обозначения материала: Ф – фрикционный, Ж – железная основа, цифры после букв – порядковый номер материала											

Таблица 7 – Свойства фрикционных изделий из материалов на медной основе

Материал	Твёрдость, НВ	Микроструктура
М-106	20-50	Твёрдый раствор олова в меди с включениями графита, свинца, железа, асбеста и пор, равномерно распределённых по полю шлифа
М-106А	20-50	Твёрдый раствор олова в меди с включениями графита, свинца, асбеста и пор, равномерно распределённых по полю шлифа
М-140	40-50	Твёрдый раствор олова в меди с включениями графита, свинца, железа, муллита и пор, равномерно распределённых по полю шлифа
МК-5	20-50	Твёрдый раствор олова в меди с включениями графита, свинца, железа и пор, равномерно распределённых по полю шлифа
ФМ-6	30-50	Твёрдый раствор олова в меди с включениями железа, ситалла, окиси кремния, свинца, дисульфида молибдена и пор, равномерно распределённых по полю шлифа
ФМ-7	25-50	Твёрдый раствор олова в меди с включениями свинца, железа, графита, оксидов РЗЭ и пор, равномерно распределённых по полю шлифа
ФМ-8	25-50	Твёрдый раствор олова в меди с включениями графита, свинца, железа, оксидов РЗЭ и пор, равномерно распределённых по полю шлифа. Допускается наличие никеля в свободном состоянии.
ФМ-9	30-50	Твёрдый раствор олова в меди с включениями графита, свинца, железа, оксидов иттрия и пор, равномерно распределённых по полю шлифа
ФМ-10	30-50	Твёрдый раствор олова в меди с включениями графита, свинца, титана и пор, равномерно распределённых по полю шлифа

Таблица 8 – Свойства фрикционных изделий на железной основе

Материал	Твёрдость, НВ	Микроструктура
ФЖ-2	80-120	Перлит, феррит до 30%, цементит, графит, асбест и силикокальций
ФЖ-7 ФЖ-7А	31-60	Феррит, перлит до 70%, цементит, сульфиды, графит и ситалл
ФЖ-8	31-60	Феррит, перлит до 30%, сульфиды, графит и ситалл
ФЖ-9	80-130	Перлит, феррит до 20%, цементит, отдельные включения ледебурита, графит, фосфидная эвтектика, поры
ФЖ-10	102-131	Перлит, феррит до 30%, включения цементита, графита, фосфидная эвтектика, поры
Шадеф	31-50	Перлит, отдельные включения цементита, графит и ситалл

Таблица 9 – Фрикционные характеристики металлокерамических фрикционных материалов

Марка материала	Испытания в условиях жидкостного трения в паре со сталью 45 ГОСТ 1050-88 и со сталью 65Г ГОСТ 14959-79			
	Режим работы		Интенсивность изнашивания, мкм/км	Коэффициент трения
	Удельная нагрузка, МПа	Скорость скольжения, м/с		
М-106	4±0.2	8±1.0	2-5	0.06-0.07
М-106А	4±0.2	8±1.0	2-5	0.06-0.07
М-140	4±0.2	8±1.0	4-8	0.07-0.09
ФМ-6	4±0.2	8±1.0	8-10	0.04-0.07
ФМ-7	2.5±0.2	20±1.0	2-5	0.065-0.07
МК-5	4±0.2	10±1.0	1-2	0.035-0.05
Шадеф	4±0.2	10±1.0	2-4	0.07-0.09
ФЖ-7	4±0.2	10±1.0	2-6	0.05-0.07
ФЖ-7А	4±0.2	10±1.0	2-6	0.05-0.07
ФЖ-8	4±0.2	10±1.0	2-6	0.06-0.08
ФМ-8	2.5±0.2	10±1.0	2-5	0.065-0.07
ФМ-9	3±0.2	10±1.0	2-5	0.07-0.08
ФМ-10	4±0.2	10±1.0	2-8	0.07-0.08

Добавки, обеспечивающие достаточно высокий коэффициент трения должны иметь следующие свойства: высокую температуру плавления и диссоциации, не претерпевать полиморфных превращений в заданном интервале температур, не взаимодействовать с другими компонентами материала и с защитной средой при спекании, быть достаточно прочными и твёрдыми, хорошо сцеплять с металлической основой.

Суммарное содержание фрикционных добавок (оксиды кремния, алюминия, железа; нитриды бора, магния, марганца, хрома, титана; карбиды бора; силициды железа; муллит; ситалл; чугун и другие) составляет 0.5-10 % в материалах для работы при сравнительно низких температурах, 10-15 % в материалах применяемых в средненагруженных узлах, 15-25 % и более в материалах работающих при высоких температурах (1000° С и выше).

Влияние фрикционных добавок на свойства порошкового материала весьма сложное, но практически всегда, с увеличением их количества, уменьшается плотность материала и растёт пористость, а фрикционные, прочностные характеристики и характеристики износа в большинстве случаев, изменяются немонотонно, проходя через максимум или минимум, т.е. для каждой из добавок существует оптимум её содержания во фрикционном материале.

Марки порошков используемые в производстве металлокерамического материала представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Марки порошков использующихся в производстве фрикционных изделий

№ п/п	Наименование материалов	Марка	ГОСТ, ТУ
1	2	3	4
1	Порошок медный электролитический	ПМС-1 ПМС-2	ГОСТ 4960-75
2	Порошок свинцовый	ПСА, ПСА-1, ПСА-2	ТУ48-6-123-91
3	Порошок оловянный	ПО-1, ПО-2, ПО-3, ПОО	ГОСТ 9723-73 ТУ48-0220-42-91

Окончание таблицы 10

1	2	3	4
4	Порошок железный	ПЖВ3-16022-26 ПЖВ4-16022-26 ПЖВ3-7122-26 ПЖВ4-7122-26	ГОСТ 9849-86
5	Графит Завальевского месторождения	МККЗ	ТУ21-25-108-73
6	Графит кристаллический литейный	ГЛ-1	ГОСТ 5279-74
7	Барий сернокислый		ГОСТ 3158-75
8	Ситалл		ТУ21УСССР152-79
9	Оксиды редкоземельных элементов		ТУ95 291-84
10	Порошок никелевый	ПНК-1	ГОСТ 9722-79
11	Муллит	МЛС-62, МЛС-70-24 МЛУ-70-22	ГОСТ 24709-81

4 МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЙ ФРИКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ МК-5

В различных странах применяются разнообразные спеченные фрикционные материалы для работы в условиях смазки. Наиболее типичным материалом является оловянистая бронза, которая отличается типом и содержанием фрикционных добавок. В Советском Союзе под руководством В. С. Рокоссовского создаётся фрикционный материал МК-5 и технологический процесс производства из него дисков. Этот материал содержит (%): олово – 9; свинец – 9; железо – 4; графит – 7. Каждому компоненту данного материала приписывается своя функция.

В настоящее время медь является наиболее распространенным металлом, используемым в качестве основы фрикционных материалов. В материалах такого типа содержание меди колеблется в широких пределах (50–90%). Медь обладает высокой теплопроводностью, что обеспечивает хороший отвод тепла в процессе трения. Медный порошок легко прессуется благодаря присущей меди пластичности и не вызывает трудностей при спекании. Однако чистый медный порошок в качестве основы фрикционных материалов применяется сравнительно редко. Результаты испытания образцов из чистой спеченной меди показали, что при трении по стальному контртелу наблюдается высокий коэффициент трения (0.7–0.9). Уже через несколько минут стальное контртело покрывается медным слоем, что приводит к схватыванию трущихся поверхностей.

Наиболее подходящим для изделий фрикционного назначения является использование порошка меди полученного электролизом с дендритной формой частиц. В технологии получения фрикционных дисков возможно использование порошка меди ПМС-1, ПМС-2 ГОСТ 4960-75, при этом основными контролируемыми параметрами являются: насыпная плотность, гранулометрический состав, кислород, прокалённый остаток. При использовании в качестве защитно-восстановительной атмосферы при получении фрикционных дисков азото-водородной смеси восстановительный отжиг не используется.

С целью повышения механических свойств меди, придания ей большей теплостойкости и улучшения характеристик трения к медному порошку добавляют порошки других металлов, в процессе спекания легирующих медную основу. Наибольшее распространение в качестве легирующего элемента в материалах на медной основе получило олово, которое добавляется в виде порошка в количестве 4–12 %. Объясняется это тем, что сплавы медь – олово (оловянистые бронзы) являются одними из наиболее эффективных сплавов для работы в условиях трения. Кроме того, производство деталей из материалов на основе сплавов медь – олово не встречает технологических трудностей. Добавка олова к медному порошку повышает

механическую прочность сырых прессовок и спеченных образцов, а также твердость последних (рисунок 10).

Износ двойных сплавов медь — олово несколько снижается по мере повышения содержания олова, однако коэффициент трения становится более нестабильным. Форма и размер частиц порошка олова не оказывает существенного влияния на технологические свойства и структурообразование, так как оно в результате диффузионных процессов растворяется в меди.

В любом фрикционном материале присутствуют компоненты, которые уменьшают либо устраняют схватывание и заедание, способствуют плавности трения и уменьшению износа поверхностей. В материале МК-5 такими компонентами является графит и свинец.

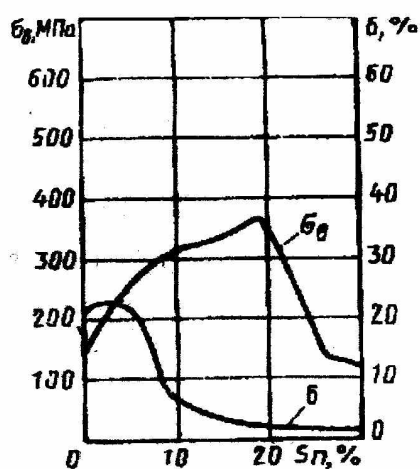


Рисунок 10 – Влияние олова на механические свойства бронзы

В процессе трения двух контактирующих поверхностей, когда температура на границе контакта превышает температуру плавления легкоплавкой добавки, последняя плавится и образует на поверхности плёнку. Эта плёнка уменьшает коэффициент трения и, как следствие, температуру на поверхности трения (принцип саморегулирования). Образование жидкой смазочной плёнки способствует плавному и устойчивому скольжению, что весьма важно при повышенных температурах, когда металлическая матрица обладает большей склонностью к схватыванию и заеданию.

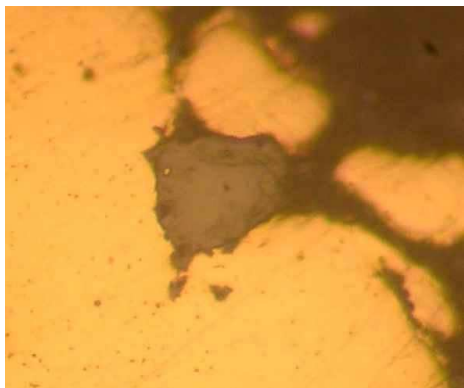


Рисунок 11 – Частица свинца в материале МК-5

Свинец при получении материала фрикционной накладки практически не растворяется в меди (около 0.3 % при температуре выше 600 °С). Поэтому в структуре фрикционного материала МК-5 он обнаруживается в виде включений приближённых к округлой форме (рисунок 11), характерного для металла, находящегося в жидком состоянии.

В практике производства изделий фрикционного назначения используется порошок свинца двух марок ПС1 и ПС2 ТУ 48-0219-61-99. Вышеуказанные марки порошка характеризуются тем, на 75-90 % состоят из частиц менее 45 мкм. Контролируемыми параметрами являются: содержание кислорода и прокалённый остаток.

Существуют две теории описывающие смазывающее действие графита в узлах трения, что указывает на отсутствие однозначного мнения. Всё сводится к тому, что его присутствие в материале способствует повышению работоспособности и снижению износа, способствует плавности трения. С повышением содержания графита износостойкость повышается. Комплекс экспериментально проведенных работ показал, что в системе медь-олово-графит содержание олова должно быть более 5 %, а при работе с ответной закалённой деталью его содержание возможно увеличить до 10 %. Существует прямая зависимость, показывающая, что чем больше олова (твёрже бронза), тем больше должно быть содержание графита. Согласно литературных данных, увеличение количества графита снижает коэффициент трения, однако существует концентрация, при которой происходит увеличение интенсивности износа. Увеличение содержания графита, при высокой насыпной плотности, способствует снижению механической прочности.

Промышленностью выпускается большое разнообразие порошков графита, применяемых в промышленности в различных целях: серебристый (кристаллический), скрытокристаллический (аморфный), тигельный, элементный; коллоидный, карандашный. В спеченных фрикционных материалах возможно применение различных сортов графита, основными из которых являются: графит карандашный ГК-1 ГОСТ 4404-78; графит МККЗ ТУ 21-25-108-73; графит элементный ГЭ-1 ГОСТ 7478-75. Основными контролируемыми параметрами являются: зольность (не менее 10 %), влажность, гранулометрический состав (остаток на сите +016 не более 40 %, +0063 не более 25 %).

Для повышения коэффициента трения до требуемого значения используются фрикционные добавки, основной задачей которых является не износ сопрягаемой детали (контртела), а обеспечение оптимального уровня зацепления. Для этих целей приемлемым является использование как металлических так и не металлических добавок. Для фрикционных материалов на основе меди в качестве такой добавки наибольшее распространение получило железо и металлокерамические тугоплавкие материалы (оксиды, карбиды). Согласно литературных данных, максимальной износостойкостью характеризуется фрикционный материал на основе меди с содержанием железа 2 %. Если исключить износ в период приработки и считать, что он закончился после 200 торможений от начала испытаний, то более износостойкими следует считать диски, содержащие в накладках 4-6 % железа. Повышение содержания железа до 8 % вызывает повышение как суммарного, так и установившегося износа.

Для производства фрикционных изделий с использованием материала МК-5 наибольшее распространение получил порошок железа ПЖВ 3-160.22-26, ПЖР 3.200-28 ГОСТ 9849-86 со следующими контролируемыми параметрами: текучесть, насыпная плотность, содержание кислорода, углерода, влажность, гранулометрический состав.

Многолетний опыт Института порошковой металлургии в создании фрикционных материалов показал, что в большинстве случаев, металлокерамические фрикционные материалы на основе меди представляют собой оловянистую бронзу с антифрикционными и фрикционными добавками. Выбор добавок определяется конкретными условиями эксплуатации. Материал МК-5 не должен и не может эксплуатироваться в узлах принципиально различного назначения. Триботехнические характеристики фрикционного материала МК-5 приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Триботехнические характеристики материала МК-5

Условия испытаний				Триботехнические характеристики		
Скорость скольжения, м/с	Удельная работа, кгс·м/см ²	Удельная нагрузка, кгс/см ²	Смазка	Коэффициент трения		Износ, мкм/100 торможений
				динамический	статический	
15	5.8	14.5	ДП-8	0.06	0.14-0.16	0.4
20	21.0	38.0	МТ-16П	0.05		1.4

Физико-механические характеристики металлокерамического фрикционного материала МК-5 представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Физико-механические характеристики материала МК-5

Характеристика	Значение
Плотность, г/см ³	6,0 – 6,2
Твёрдость при температуре, °С	
20	25-28
60	18-25
500	10-12
Ударная вязкость, кгс·м/см ²	0.3 – 0.5
Предел прочности, кгс/мм ² , при	
растяжении	2.4
сжатии	25 – 28
срезе	5.7
Коэффициент теплопроводности в интервале температур 20-500°С, кал/(см·с·°С)	0.095 – 0.100
Коэффициент линейного расширения в интервале температур 20-500°С, α·10 ⁻⁶	17.6 – 22.0

На рисунке 12 представлено распределение элементов материала МК-5 по сечению фрикционного диска.

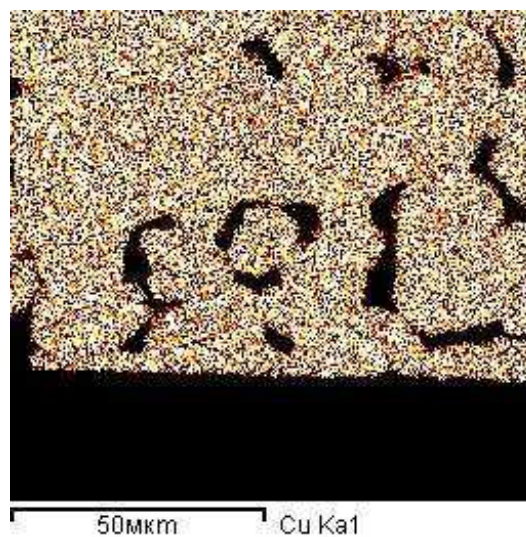
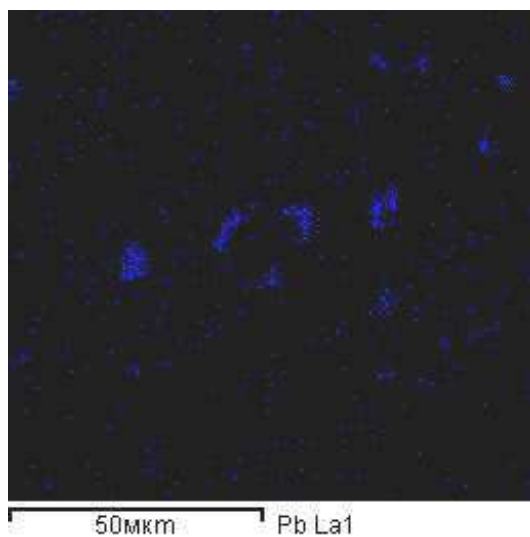
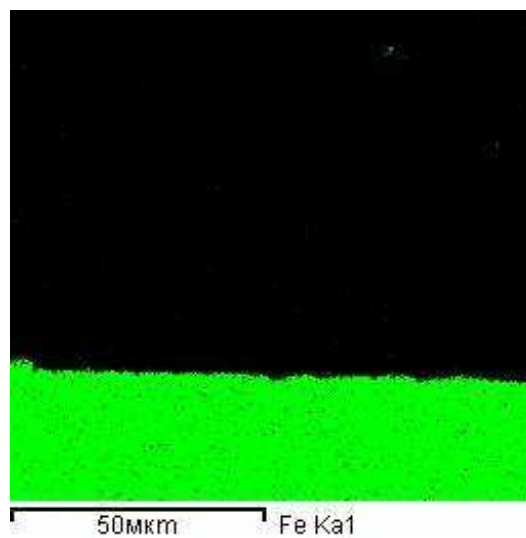
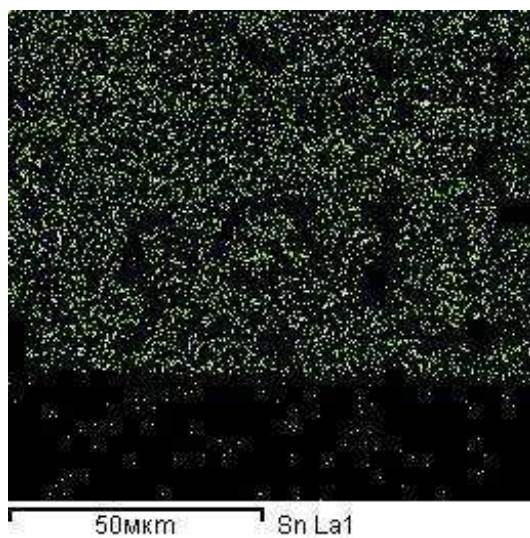
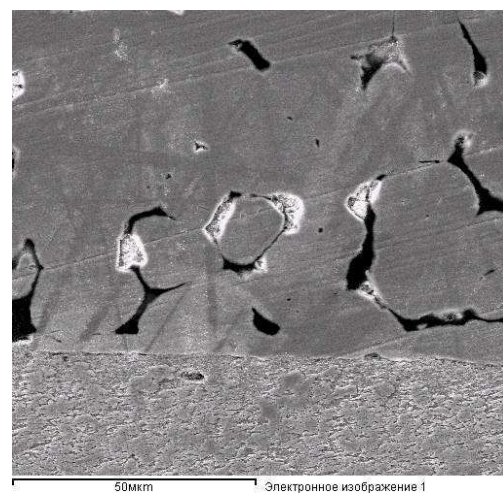
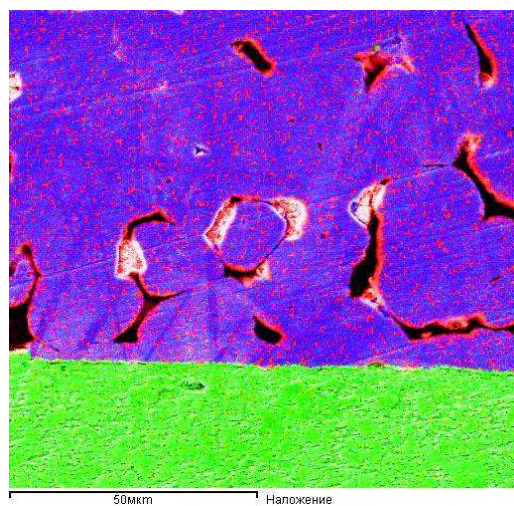


Рисунок 12 – Распределение элементов материала МК-5 по сечению фрикционного диска

На рисунке 13 представлен график процесса торможения тормоза с фрикционными материалом МК-5.

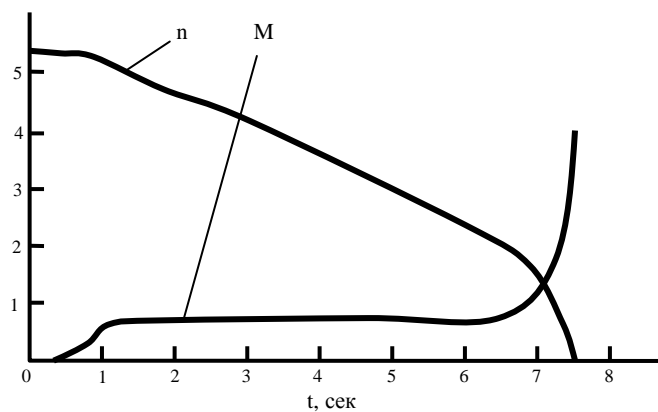


Рисунок 13 – График процесса торможения тормоза 2522-3502010 (МТЗ) при 1250 циклах торможения ($n=0.2 \cdot 10^3$ об/мин, $M=10^3$ Н·м)

На рисунке 14 приведен график зависимости коэффициента трения от скорости скольжения для различных скоростей вращения.

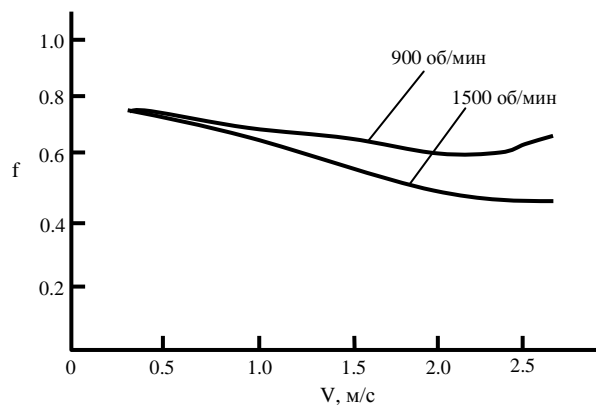


Рисунок 14 – График зависимости коэффициента трения от скорости скольжения

5 МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ФРИКЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Наиболее распространённым процессом производства фрикционных дисков является прессование накладки и спекание её под давлением к стальной основе. Прессование позволяет получить накладку по форме и размерам соответствующую готовой детали с припуском на последующие технологические операции (спекание, механическая обработка). Этот процесс используется из-за простоты пресс-форм для получения фрикционных накладок, простотой технологической оснастки, однако имеет ряд существенных недостатков: низкую производительность, высокую трудоёмкость из-за использования ручного труда при сборке пакетов, трудоёмкость процесса механической обработки и ряд других.

Исключение процесса механической обработки возможно в случае прессования фрикционной накладки профильными пуансонами, однако это влечёт за собой увеличение брака из-за низкой прочности прессовок при транспортировке, сборке пакетов, а также невозможность изготовления накладок большого диаметра.

Формование системы маслоотводящих канавок возможно производить с использованием промежуточных прокладок из жаропрочного материала с пазами и канавками в процессе горячего прессования. Однако данный процесс требует большого расхода жаропрочного материала, трудоёмкость изготовления системы канавок на поверхности.

Имеет место и процесс напрессовки шихты фрикционного материала на стальную основу, с последующим спеканием под давлением. Данный процесс позволяет увеличить производительность за счёт одновременного формования двух накладок, исключить возможность смещения, однако не исключает процесс последующей механической обработки. Данный процесс требует дополнительного электролитического лужения омеднённой поверхности. Использование прокладочных колец с системой маслоотводящих канавок при прессовании и последующем спекании под давлением, позволяет полностью исключить процесс механической обработки. Недостатком данного процесса является сложность конструкции прессового инструмента.

Деталью диска, воспринимающей усилие, является берилиевое кольцо. Для предохранения от коррозии его анодируют или покрывают слоем серебра гальваническим способом. Фрикционная накладка сегментной формы изготавливается двухслойной и содержит фрикционный слой (какой-либо из известных фрикционных материалов) и подслоя железного порошка. Накладку изготавливают совместным прессованием обоих слоёв в стальной пресс-форме с последующим спеканием под давлением. Накладку с кольцом соединяют пайкой серебром или другим высокотемпературным припоем. Спекание под давлением и пайка производятся в пресс-формах, пуансоны которых снабжены внутренними нагревателями.

Предложен способ, в котором порошковую смесь прессуют под давлением $0.5-0.9 \text{ кгс/м}^2$ в зависимости от величины конечной плотности. Спрессованные заготовки укладывают в специальное приспособление, в котором слои изделий прокладываются технологическими дисками из нержавеющей стали для исключения припекания. Приспособление в собранном виде помещают под пресс, где осуществляют подпрессовку заготовок под давлением $70-220 \text{ кгс/см}^2$ с фиксацией изделий в сжатом состоянии при заданном давлении. После этого заготовки спекают в проходных печах без применения внешнего давления при температуре $953-1023 \text{ K}$ в течение двух – трёх часов. Данный способ позволяет получить более высокое качество изделий за счёт устранения выплавления компонентов смеси, имеющих низкую температуру плавления.

Имеется способ получения изделий на основе оловянистой бронзы путём прессования порошковой смеси с последующим спеканием спрессованных заготовок фрикционных дисков в сжатом состоянии. Отличительной особенностью данного способа является спекание заготовок при $833-853 \text{ K}$ под давлением $50-75 \text{ кгс/см}^2$ в течение 6 часов. Способ позволяет упростить технологию за счёт снижения температуры спекания.

Получить более компактный материал возможно при нагреве шихты фрикционного материала до 150° С при одновременном воздействии ультразвуковых колебаний в течении 1-3 сек и последующим уплотнением горячим прессованием.

Известно достаточно много методов получения фрикционных изделий напылением (газопламенным или плазменным). При этом стальную основу подвергают дробеструйной или пескоструйной обработке, затем методом напыления наносится промежуточный слой самофлюсующего сплава толщиной 1-100 мкм. В процессе спекания происходит расплавление самофлюсующего слоя с последующей микросваркой контактирующих поверхностей. В качестве самофлюсующегося используется сплав П2ХН-СР-2.

Предложен способ изготовления спеченных фрикционных дисков, имеющих сложную форму, для дисковых муфт. На металлическую основу с одной или двух сторон наносится напылением порошок фрикционного материала. Полученную заготовку спекают, прессуют до заданной пористости и затем снова спекают. Спекание осуществляется в восстановительной атмосфере, что способствует удалению окисных плёнок на подложке и образованию более прочных связей между подложкой и покрытием. Толщина покрытия составляет 0.1-1.5 мм.

Порошковая смесь необходимого состава на медной основе прессуется в брикеты под давлением 0.1-0.3 кгс/м², брикеты спекают при 1123-1173 К в течение одного часа в потоке азота. Спеченные брикеты измельчают в порошок с размером частиц -80 +40 мкм, который затем напыляют в кислородно-водородном пламени на медную подложку. Толщина покрытия равна 0.6 мм.

В практике производства фрикционных изделий имеет место метод электроформования фрикционного слоя на поверхности стальной основы. Предварительно сформованную фрикционную накладку спекают методом электросопротивления на стальной основе. Улучшение припекания достигается за счёт применения наплавочных слоёв (медь, латунь, бронза, олово, цинк).

Все методы электроформования требуют специализированного оборудования, высококвалифицированного рабочего персонала и не нашли промышленного применения из-за следующих недостатков: низкая производительность, большие потери в брак из-за неравномерного электросопротивления шихты, вызывающего подгорания по плоскости припекания.

Одним из перспективных методов формования фрикционных накладок, особенно при изготовлении изделий с минимальной толщиной рабочего слоя или особой формы, когда применение обычных методов изготовления невозможно, является метод прокатки порошковой шихты. Прокатка порошковой ленты даёт возможность получения более однородной плотности. Сущность этого способа заключается в пропускании фрикционной порошковой шихты между горизонтально расположенными валками, прессующими ленту. Затем лента подвергается предварительному спеканию, за которым идёт окончательное уплотнение и доводка в размер порошковой ленты. Окончательное спекание даёт возможность получения фрикционной ленты с заданными физико-механическими характеристиками. Предложен способ получения заготовки диска фрикционного по следующей технологии, на стальную основу свободной насыпкой наносится фрикционный слой, а затем пропускается через валки прокатного стана, что приводит к формованию фрикционного слоя на основе.

Одним из возможных методов получения фрикционного изделия является пайка, при этом к предварительно спрессованную накладку паяют серебрянным или другим высокотемпературным припоем к стальной основе в специальной пресс-форме с внутренними нагревателями. Данный процесс имеет достаточно низкую производительность и требует специализированного оборудования. В качестве промежуточного подслоя возможно использование смеси порошков меди и олова, наносимый на свеж активированную поверхность стальной основы. Активация поверхности производится водным раствором борной кислоты.

Соединение стальная основа – фрикционный материал полученное данным способом имеет хорошие, гарантируемые механические свойства, при достаточной простоте технологического процесса. К данной категории возможно отнесение и способа получения соединения фрикционного изделия с помощью процесса сварки.

Заслуживают внимания и некоторые другие методы получения фрикционных изделий. Вот некоторые из них: на стальную основу методом свободной насыпки формируется фрикционный слой нужного состава, который подвергается инфракрасному облучению до температур, обеспечивающих уплотнение слоя и высокую прочность сцепления его с основой.

6 МЕТОД СВОБОДНО НАСЫПАННОГО СЛОЯ

Наиболее распространённым методом получения фрикционных дисков является закрепление на стальной основе свободно насыпанного фрикционного слоя материала напеканием. Его суть сводится к формированию фрикционного слоя на поверхности стальной основы свободной насыпкой с последующей термообработкой для его закрепления. Данный метод имеет высокую производительность, возможность автоматизации и механизации, позволяет изготавливать фрикционные диски большого диаметра (до 600 мм), получение которых другими методами затруднено. Описанным методом производства фрикционных дисков пользуется МолЗПМ, при этом для материалов на основе меди используется промежуточный подслой электролитической меди. Методом напекания свободно насыпанного слоя пользуются и другие производители фрикционных дисков, такие как: «Hoerbiger», «Miba» (Австрия), «Valeo» (Франция), «Wellman», «Hawk», (США), Pramet (Чехия).

Структурная блок-схема производства фрикционных дисков методом свободно насыпанного слоя представлена на рисунке 15 и включает следующие операции: изготовление стальной основы; нанесение промежуточного подслоя гальваническим способом; формование металлокерамического фрикционного слоя на поверхности стальной основы с одной стороны диска; спекание; формование металлокерамического фрикционного слоя на поверхности стальной основы с другой стороны диска; спекание; формование системы маслоотводящих каналов и пазов; окончательное спекание с целью получения требуемого состава фрикционного материала.

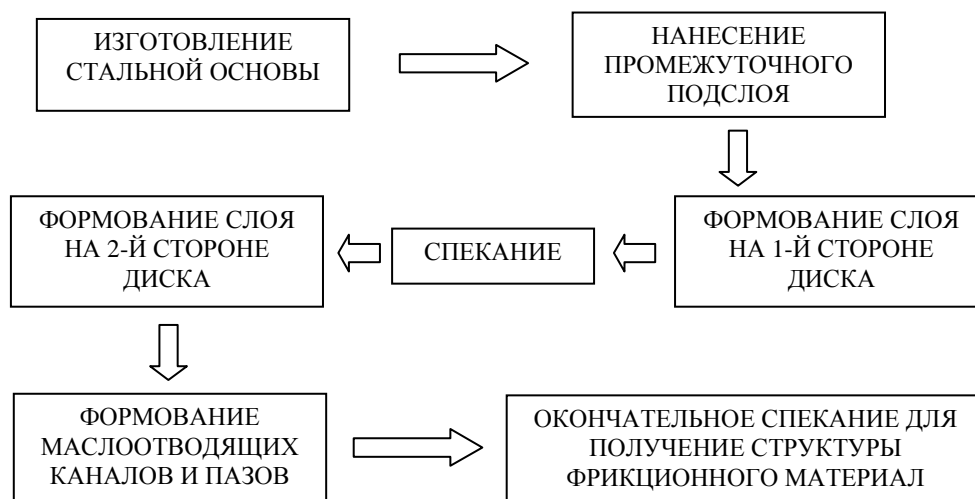


Рисунок 15 – Структурная блок-схема производства фрикционных дисков методом свободно насыпанного слоя

Однако, наряду с явными преимуществами этому методу присущ и существенный недостаток: необходимость нанесения гальванопокрытия на стальную основу. В промышленных условиях его использование требует больших вложений, наличия значительных площадей и эффективных очистных сооружений, дорогостоящих расходных материалов. Основной проблемой такого производства является снижение предельно допустимой концентрации тяжёлых элементов в промывных водах, способных оказывать существенное влияние на экологию и окружающую среду, здоровье человека. Расход воды на промывку после подготовительных операций в 3-7 раз превышает расход воды на промывку после гальванических покрытий, а состав стоков представлен в виде твёрдых отходов и комплексных соединений.

Наиболее опасными компонентами промывных вод гальванического производства являются ионы металлов (меди, цинка, никеля, кадмия, хрома, олова), предельно допустимая концентрация по которым чаще всего составляет десятые и сотые доли миллиграммов на литр. К

примеру, наличие ионов меди в промывных водах, вызывает образование синильной кислоты, от которой при концентрации 0.1 мг/л погибает форель. Сложность физико-химического состава сточных вод обуславливает необходимость использования нескольких методов очистки, скомбинированных в разных сочетаниях и дающих большое количество возможных технологических схем. Не менее опасны выбросы в воздух в виде паров, так для процесса меднения присущи выбросы двуокиси азота, серной кислоты, окиси углерода, соляной кислоты.

Если провести анализ причин брака в условиях массового производства фрикционных дисков, можно заметить, что в большинстве случаев (около 90 %) это связано с низким качеством крепления гальванического слоя меди к стальной основе. На рисунке 16 представлены образцы фрикционных дисков с отслоением фрикционного материала от основы при внешне качественном слое гальванической меди.



Рисунок 16 – Образцы фрикционных дисков с отслоением фрикционной накладки от стальной основы

7 МЕТОДЫ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Многообразие явлений, протекающих в зоне фрикционного контакта, огромное количество отличающихся по составу, структуре и свойствам триботехнических материалов, существенные различия узлов трения по конструкциям и условиям нагружения обуславливают невозможность с достаточной для практического использования степенью точности прогнозировать расчетными методами надежность и долговечность подвижных сопряжений машин и механизмов и метод триботехнических испытаний.

При проведении триботехнических испытаний решают следующие задачи:

1. Исследование контактного взаимодействия твердых тел, изучение природы и механизмов трения и изнашивания;
2. Определение параметров трения (износ, коэффициент трения), области работоспособности материалов (диапазон рабочих скоростей, нагрузок, температур, внешних условий). Классификация материалов;
3. Оценка пределов работоспособности, срока службы изделий и узлов трения и качества изготовления по критериям износостойкости.

Как правило, для оптимизации продолжительности исследований и снижения стоимости работ, испытания на трение и износ проводят в следующей последовательности (рисунок 17).



Рисунок 17 – Этапы испытаний на трение и износ

Первый этап испытаний является предварительным и обычно проводится с целью определения физико-механических свойств материалов для расчета фрикционных характеристик. Однако в настоящее время наука о трении не может однозначно прогнозировать поведение пар трения по их физико-механическим характеристикам.

Второй этап проводится для оценки влияния физико-механических характеристик и режимов трения (скорость, нагрузка, температура) на коэффициент трения и износ материалов. Определение на лабораторных установках значений коэффициентов трения и величин износа на образцах материалов в условиях моделирования работы реальных узлов трения. Испытания, как правило, проводятся при переменных условиях (скорость, нагрузка, температура и т.п.). В результате испытаний регистрируется зависимость: фрикционные свойства - определяющий параметр, которая позволяет определить область работоспособности материала.

Третий этап проводится с целью определения влияния различных конструктивных особенностей узла трения на фрикционные характеристики материалов. Он может осуществляться как в лабораторных условиях на установках, представляющих собой типовой узел трения, так и в полевых условиях на реальных изделиях. Стендовые испытания позволяют:

- изучать влияние отдельных факторов на работу узла и агрегатов;

- создать стабильный режим нагружения, близко воспроизводящий те или иные эксплуатационные условия;
- применять увеличенные или учащенные нагрузки по сравнению с эксплуатационными для ускорения испытаний;
- реализовать специальные режимы нагружения для сравнительной оценки различных конструкций и технологий изготовления.

При сроке службы машин, исчисляемом многими тысячами рабочих часов, стендовые испытания являются во многих случаях единственной возможностью современной экспериментальной проверки конструкций.

Заключительный этап проводится для определения надежности и долговечности работы механизма в целом. Он реализуется обычно в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации механизма. Этот этап позволяет получить наиболее ценные сведения о работе машины в условиях её эксплуатации и является основой для совершенствования конструкции машины, уточнения характера профилактических мероприятий по техническому обслуживанию машины и потребности в запасных частях.

Каждый последующий этап испытаний характеризуется постепенным приближением работы материалов пар трения к реальным условиям. Каждый этап испытаний позволяет решать ряд самостоятельных задач. Особенностью триботехнических испытаний является значительная их продолжительность и соответственно высокая стоимость (таблица 13).

Таблица 13 – Характеристики триботехнических испытаний

Вид испытаний	Объект испытаний	Оцениваемые характеристики	Время испытаний	Стоимость испытаний
Лабораторные (физико-механические свойства)	Материал	Твердость, структура, теплофизические и др.	часы	50-150
Лабораторные (триботехнические свойства)	Пара трения	Коэффициент трения, износ	дни	500-5000
Стендовые	Деталь, узел	Износостойкость в заданных условиях работы	недели	10000-50000
Натурные	Узел, изделия	Износостойкость в реальных условиях работы.	месяцы	250000

Виды испытаний на износостойкость и их характеристики представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Виды (этапы) испытаний на износостойкость и их характеристика

Виды (этапы) испытания	Объекты испытаний	Условия испытаний	Характеристика получаемых данных	Область применения
1	2	3	4	5
Лабораторные испытания образцов материала	Образцы материала	Вариация нагрузки и (или) температуры при различных условиях и видах воздействий окружающей среды	Оценка совместимости пар трения; определение предельных силовых и тепловых нагрузок и определение критических точек, после которых наблюдается заметное изменение силы трения или уменьшение износостойкости	Исследование новых материалов, приближенная оценка области рационального применения, анализ механических и физико-механических процессов в поверхностных слоях. Контроль стабильности свойств материалов при их производстве

Окончание таблицы 14

1	2	3	4	5
Лабораторные испытания малогабаритных образцов	Малогабаритные образцы трибосопряжений	Моделированные условия внешнего воздействия, обеспечивающие воспроизведение заданного процесса изнашивания, температурно-силовых полей такой же интенсивности, как в натуральных трибосопряжениях	Фрикционно-износные характеристики пары трения при заданных условиях	Испытаниям должны предшествовать определение масштабных коэффициентов перехода. Анализ износостойкости материала, исследование процесса изнашивания. Получение исходных данных для натуральных испытаний
Стендовые испытания	Натурные образцы трибосопряжений, сборочные единицы	Воспроизведение на стенде реальных условий эксплуатации	Показатели износостойкости при моделированных условиях эксплуатации	Оценка влияния на фрикционно-износные характеристики пары трения конструкции трибосопряжения. Определение ресурса изнашивания элементов и норм допустимого износа. Контроль качества при производстве
Полигонные испытания	Готовые изделия и комплексы	Моделированные на полигоне условия, соответствующие одному или нескольким внешним воздействующим факторам	Показатели и значения износа при моделировании одного или нескольких воздействующих факторов на полигоне	Оценка влияния конструкции и одного или нескольких внешних воздействующих факторов на износостойкость трибосопряжений
Эксплуатационные испытания	Готовые изделия и комплексы	Реальное разнообразие условий изнашивания или типовые условия эксплуатации	Ресурс изделий по параметрам износостойкости	Оценка влияния конструкции изделия и реальных условий эксплуатации на износостойкость

В упрощенном виде все триботехнические испытания можно свести к одной схеме (рисунок 18) [19].

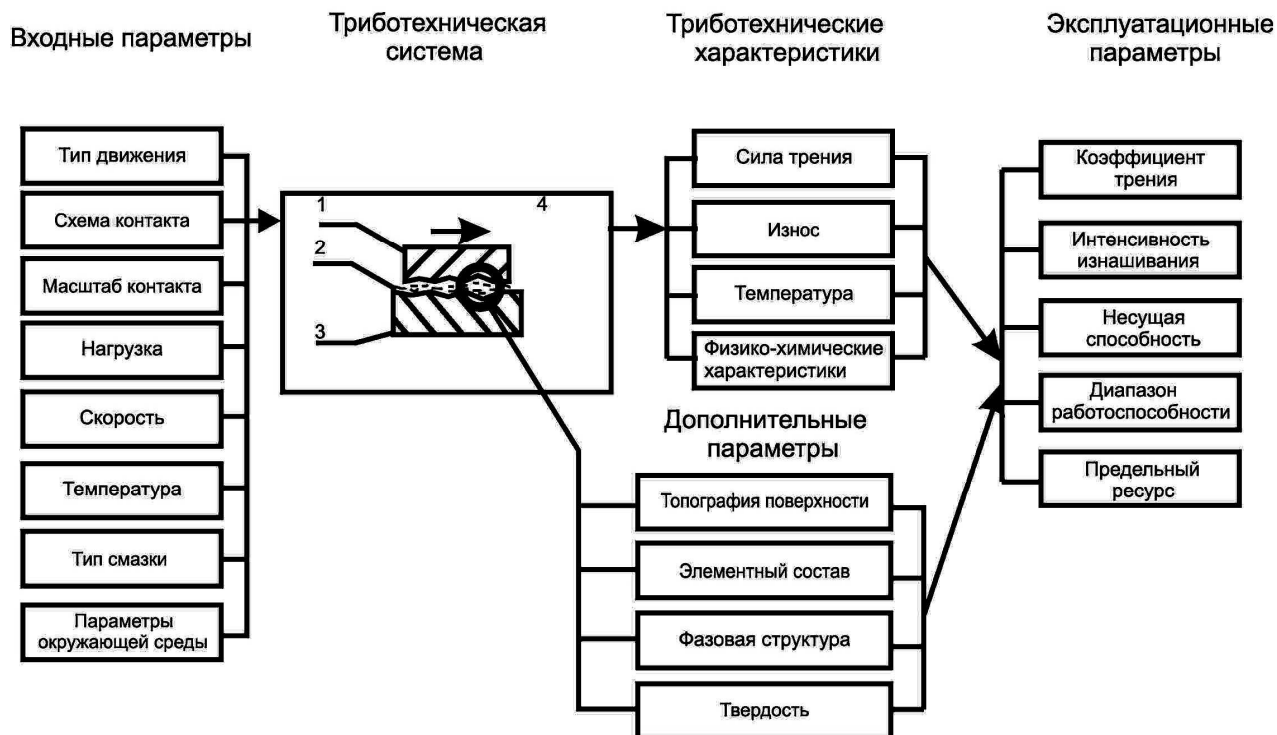


Рисунок 18 – Схема триботехнических испытаний

На триботехническую систему влияет некоторый набор входных параметров: постоянных, которые как правило в процессе исследований не изменяются: тип движения (однонаправленное, реверсивное, циклическое), схема испытаний, масштаб контакта (нано-, микро-, макро- контакт) и переменных – которые могут быть изменены в процессе исследований (скорость, нагрузка, температура, интенсивность смазки, время испытаний).

Триботехническая система состоит из исследуемых образцов 1, 2, смазки 3 и окружающей среды 4. В процессе исследований, при заданных входных переменных в триботехнической системе происходят изменения, которые вызывают изменения триботехнических характеристик (силы трения, температуры, износа). Кроме того, наблюдаются, изменения и физико-механического состояние элементов системы, механизмов их взаимодействия, что может быть зарегистрировано дополнительными характеристиками механическими, теплофизическими, физико-химическими, оптическими. В дополнении к ним, как правило, до и после завершения триботехнических исследований определяют топографию поверхности образцов, изменение элементного и фазового состава поверхности и подповерхностных слоёв материалов, твердость.

На основании полученных триботехнических характеристик и дополнительных исследований определяются эксплуатационные параметры материалов (коэффициент трения, интенсивность изнашивания или износостойкость, несущая способность, предел работоспособности, параметры фрикционной усталости, прирабатываемость, надежность работы, восстанавливаемость).

В большинстве стран существуют национальные стандарты на проведение триботехнических испытаний материалов, однако, до настоящего времени большинство стандартов не отражают всего многообразия комбинаций материалов и условий трения и изнашивания. Преобладают стандарты, которые регламентируют испытания конкретных видов изделий, содержащих спеченные порошковые или иные материалы – подшипниковых узлов, муфт, тормозов. Методика испытаний должна быть согласована с возможностями испытательной установки, оптимизирована экспериментально для конкретной испытываемой пары трения для получения наиболее достоверной и полной информации по ее износу [20]. При проведении триботехнических испытаний выполняются следующие этапы: выбор испытательной установки; подготовка образцов; приработка триботехнической системы; триботехнические испытания; физико-химические исследования; математическая обработка полученных результатов и определение исследуемых эксплуатационных параметров.

8 ОСНОВНЫЕ ТИПЫ МАШИН ТРЕНИЯ

Для организации проведения триботехнических исследований применяются машины трения и испытательные устройства самых разнообразных типов, число которых может составить сегодня многие сотни и даже тысячи наименований. Кроме того, в процессе разработки новых триботехнических технологий и материалов, оценки возможности использования уже существующих материалов в новых специфических условиях эксплуатации машин, возникает необходимость разработки новых исследовательских методов и устройств. Все это требует унификации используемых в мировой практике методов испытания материалов на трение и изнашивание.

Классификация машин трения принята по схемам контакта исследуемой пары:

1) контакт поверхностей трения по площади – полный или частичный подшипник скольжения (вал и цилиндрический подшипник, вал и подшипник в виде отдельных сегментов цилиндра) и скользящие друг по другу плоские поверхности. При таких схемах трения номинальное давление на опору может достигать 80–100 МПа;

2) линейный контакт трущихся поверхностей – цилиндр и плоскость, контакт двух цилиндров по образующей. В этих случаях начальный контакт осуществляется по поверхности, образуемой в результате упругих деформаций обоих рабочих элементов; при этом начальное давление в контакте может быть вычислено. В процессе работы в условиях скольжения при возникновении изнашивания поверхность соприкосновения рабочих элементов в месте контакта будет увеличиваться, но может быть определена по величине следа износа на неподвижном образце. Данная схема трения имитирует условия работы зубчатых колес, роликовых подшипников. Максимальное давление в контакте рабочих элементов может достигать 1000-1500 МПа;

3) точечный контакт – образуется при соприкосновении рабочих элементов машин в виде двух сфер, шара и плоскости, конуса и цилиндров с взаимно перпендикулярными осями. Подобный контакт поверхностей аналогичен контакту шарика и кольца подшипника качения. Максимальное давление в контакте может достигать 5000 МПа. В работе [21] предложена классификация машин трения и испытательных установок, основанная на характере относительного движения образцов и положении вектора нагрузки относительно плоскости расположения векторов линейных скоростей основного движения (таблица 15).

Таблица 15 – Типы машин трения

Положение вектора нагрузки относительно плоскости расположения векторов линейных скоростей основного движения	Характер относительного движения образца и контртела
Вектор нагрузки параллелен плоскости расположения векторов линейных скоростей основного движения (машины трения по образующей)	Вращательное Поступательное Возвратно-вращательное Возвратно-поступательное По свежему следу Сложное
Вектор нагрузки перпендикулярен плоскости расположения векторов линейных скоростей основного движения (машины торцового трения)	Вращательное Поступательное Возвратно-вращательное Возвратно-поступательное По свежему следу Сложное

Машины трения по их техническим возможностям классифицируются следующим образом:

- машины трения, предназначенные для изучения механизмов трения и износа, исследования контактного взаимодействия материалов. К этой группе испытательных установок относятся нано-, микротрибометры, а также машины трения, в которых реализуется точечный контакт («плоскость-сфера», «диск – сфера», перекрещивающиеся цилиндры, и т.п.). Данный класс машин может применяться также для сравнительных триботехнических испытаний материалов, на которых невозможно проведение приработки (тонкие композиционные покрытия, пленки, тонкие пластины и т.п.);

- машины трения, позволяющие моделировать конкретные условия (величины нагрузок и схемы нагружения, пару трения, внешнюю среду и т.д.), в которых будет работать материал в том или ином узле трения. Машины предназначены для сравнительных испытаний триботехнических материалов, отработки составов и технологий их изготовления, оценки диапазонов работоспособности материалов, определения коэффициента трения и износостойкости. Испытания на данных машинах трения проводятся, как правило, на образцах, при этом условия работы машины моделируют работу реального узла трения. Это самая многочисленная группа машин трения;

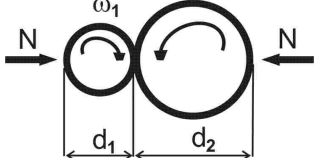
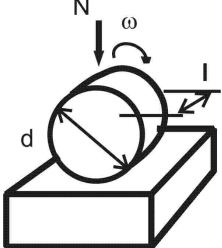
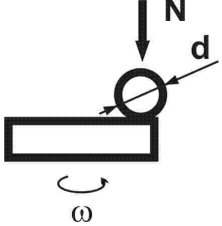
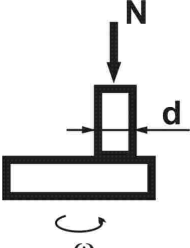
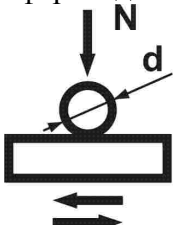
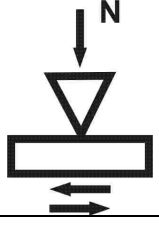
- испытательное оборудование, позволяющее моделировать работу отдельных деталей или всего узла трения. Как правило, данные испытания проводятся на узко специализированных стендах. Оборудование предназначено для сравнительных испытаний реальных изделий из спеченных порошковых и иных материалов, ресурсных и сертификационных испытаний отдельных деталей и узлов трения машин в целом.

Основные схемы контактных пар машин трения и возможные области их применение для моделирования узлов трения приведены в таблице 16.

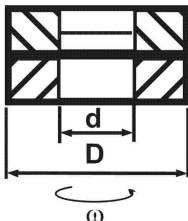
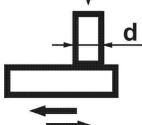
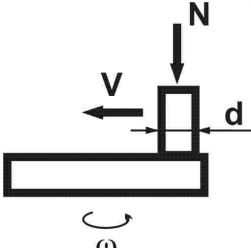
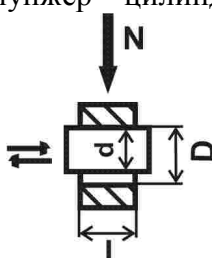
Таблица 16 – Схема контактирующих пар для триботехнических испытаний

№ п/п	Контактная пара	Формула для расчета контактного давления	Моделируемые узлы	Установка для испытаний.
1	2	3	4	5
1		$p = 0,8 \sqrt{\frac{N}{IK_{\Sigma}} \frac{D-d}{Dd}}$ $K_{\Sigma} = K_1 + K_2$ $K_1 = \frac{1-\mu_1^2}{E_1}$ $K_2 = \frac{1-\mu_2^2}{E_2}$	Подшипники скольжения, цилиндрические шарниры	СМТ-1, УМТ-1, МИ-1М
2		$p = \frac{180N}{\pi R \alpha l}$	Подшипники скольжения, цилиндрические шарниры	СМТ-1, УМТ-1, МИ-1М

Продолжение таблицы 16

1	2	3	4	5
3	<p>Вал – вал</p> 	$p = 0.8 \sqrt{\frac{N}{lK_{\Sigma}} \frac{d_1 - d_2}{d_1 d_2}}$	Зубчатые и фрикционные передачи, элементы подшипников качения	СМТ-1, МИ-1М
4	<p>Диск – плоскость</p> 	$p = 0.8 \sqrt{\frac{N}{lDK_{\Sigma}}}$	Роликовые подшипники, цепные передачи, инструмент	МТ-1
5	<p>Сфера – диск</p> 	$p = 0.9183 \sqrt{\frac{N}{d^2 K_{\Sigma}^2}}$	Исследование контактного взаимодействия Технологический контроль триботехнических характеристик материалов	Микро-, нано трибометры УМТ-1, МТ-3
6	<p>Цилиндр – диск</p> 	$p = \frac{4N}{\pi d^2}$	Подшипники скольжения, фрикционные передачи	УМТ-1, АЕ-5, МТ-2
7	<p>Сфера – диск</p> 	$p = 0.9183 \sqrt{\frac{N}{d^2 K_{\Sigma}^2}}$	Изучение контактного взаимодействия, микротрибометрия	Микро-, нано трибометры
8	<p>Конус – диск</p> 	$P = \frac{N}{\pi h^2 \sin(\alpha/2)}$	Изучение контактного взаимодействия, микротрибометрия	Микро-, нано трибометры

Окончание таблицы 16

1	2	3	4	5
9	<p>Кольцо – кольцо</p> 	$p = \frac{4N}{\pi(D^2 - d^2)}$	Торцовые опоры, торцовые уплотнения, фрикционные передачи, инструмент	УМТ-1, ИМ-58
10	<p>Пластина – цилиндр</p> 	$p = \frac{4N}{\pi d^2}$	Направляющие с поступательным и возвратно-поступательным перемещением.	МПТ-1, МИГ-1, СВП-1, 77-МТ
11	<p>Пластина – цилиндр</p> 	$p = \frac{4N}{\pi d^2}$	Направляющие со спиральным перемещением инструмент	Машины для испытания на абразивную износостойкость.
12	<p>Плунжер – цилиндр</p> 	$p = 0.8 \sqrt{\frac{N}{lK_{\Sigma}} \frac{D-d}{Dd}}$	Поршни. плунжеры, штепсельные разъемы.	УМТ-1

Форму и размеры образцов выбирают в зависимости от типа используемых для испытания машин и выбранной моделирующей схемы узла трения. Для обеспечения соответствия используемой пары трения натурному узлу по кинематическому признаку необходимо, чтобы вращающимся был образец из того же материала, из которого выполнена вращающаяся деталь натурального узла. Если это условие не выполнимо, то в качестве неподвижного образца принимают образец с большой теплопроводностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поляков, В.С. Муфты / В.С. Поляков, И.Д. Барбаш. – М.: Машиностроение, 1960. – 210 с.
2. Чичинадзе, А.В. Расчёт и исследование внешнего трения при трении торможении / А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1967. – 250 с.
3. Мигунов, В.П. Фрикционные металлокерамические фрикционные материалы для тормозов / В.П. Мигунов. – Киев: Наукова думка, 1970. – 204 с.
4. Кипарисов, С.С. Порошковая металлургия / С.С. Кипарисов. – М.: Металлургия, 1980. – 187 с.
5. Финдайзен, Б. Порошковая металлургия / Б. Финдайзен. – М.: Металлургия, 1983. – 150 с.
6. Зиновьев, Е.В. Полимеры в узлах трения машин и приборов / Е.В. Зиновьев, А.Л. Левин. – М.: Машиностроение, 1988. – 167 с.
7. Федорченко, И.М. Исследование материалов для тормозных и передаточных устройств / И.М. Федорченко, Д.Я. Ровинский. – Киев: Наукова думка, 1976. – 240 с.
8. Накладки фрикционные. Общие технические требования. ГОСТ 1786-95. Введ. 02.10.1995. – М.: Госстандарт СССР, 1995. – 12 с.
9. Михайлин, Ю.А. Технологические свойства жесткоцепных связующих / Ю.А. Михайлин, И.П. Мийченко, Е.В. Земскова. – М. Машиностроение, 1990. – № 12. – С. 20–24.
10. Бессонов, М.И. Полиимиды – класс термостойких полимеров / М.И. Бессонов, М.М. Котон, В.В. Кудрявцев. – Л.: Наука, 1983. – 328 с.
11. Костикова, В.И. Базальтоволоконные материалы / В.И. Костикова, Л.Н. Смирнова. – М.: Информконверсия, 2001. – 307 с.
12. Бартенев, Г.М. Трение и износ полимеров / Г.М. Бартенев, В.В. Лаврентьев. – Л.: Химия, 1972. – 240 с.
13. Композиционные материалы на основе базальтовых волокон: Сборник научных трудов – Киев: ИПМ, 1989. – 164 с.
14. Воюцкий, С.С. Физико-химические основы пропитывания и импрегнирования волокнистых систем водными дисперсиями полимеров / С.С. Воюцкий. – М.: Химия, 1969. – 336 с.
15. Мийченко, И.П. Полиимидные композиционные материалы, формуемые прямым и литьевым прессованием. Канд. дисс. / И.П. Мийченко. – М.: МАТИ, 1986. – 202 с.
16. Ричардсон, М. Промышленные полимерные композиционные материалы / М. Ричардсона. – М.: Химия, 1980. – 472 с.
17. Старченко, В.Н. Повышение эффективности торможения использованием новых углерод-композиционных материалов / В.Н. Старченко, Е.В. Полупан, С.И. Шевченко. – Вісник СНУ ім. В. Даля. - 2004. № 7 (77). Ч. 1. С. 137 – 142.
18. Гориславец, С.П. Пиролиз углеводородного сырья / С.П. Гориславец, Д.Н. Тменов, В.И. Майоров. – Киев: Наукова думка, 1977. – 307 с.
19. Чихос, Х. Системный анализ в трибонике / Х. Чихос. – М.: Мир, 1982. – 351 с.
20. Чичинадзе, А.В. Основы трибологии / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше. – М.: Машиностроение, 2001. – 250 с.
21. Цеев, Н.А. Материалы для узлов сухого трения, работающих в вакууме / Н.А. Цеев, В.В. Козелкин, А.А. Гуров. – М.: Машиностроение, 1991. – 199 с.